

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Peter Dolenc

**Analiza rasti v pametnem  
hidroponičnem sistemu**

MAGISTRSKO DELO  
ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE  
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

MENTOR: izr. prof. dr. Uroš Lotrič

Ljubljana, 2017



AVTORSKE PRAVICE. Rezultati magistrskega dela so intelektualna lastnina avtorja in Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavlanje ali izkoriščanje rezultatov magistrskega dela je potrebno pisno soglasje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja<sup>1</sup>.

©2017 PETER DOLENC

---

<sup>1</sup>V dogovorju z mentorjem lahko kandidat magistrsko delo s pripadajočo izvirno kodo izda tudi pod drugo licenco, ki ponuja določen del pravic vsem: npr. Creative Commons, GNU GPL. V tem primeru na to mesto vstavite opis licence, na primer tekst [1].





## ZAHVALA

*Iskrena hvala mentorju izr. prof. dr. Urošu Lotriču za uso pomoč, racionalno usmeritev, hitro odzivnost in kreativne ideje, ki so mi zelo pripomogle v navidez brezizhodnih situacijah.*

*Hvala tudi Maruši za potrpežljivost, pomoč pri presajanju sadik in skupne premisleke.*

*Hvala tudi staršema, da sta mi dovolila in tolerirala izgradnjo mojih prvih hidroponičnih sistemov v kleti.*

*Peter Dolenc, 2017*



*"You can have results or excuses, but not both."*

— Arnold Schwarzenegger



# Contents

**Povzetek**

**Abstract**

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Teoretično ozadje in dosedanje raziskave</b>	<b>3</b>
2.1	Hidroponika . . . . .	3
2.2	Pristop govorečih rastlin . . . . .	5
2.3	Vpliv dejavnikov na rast rastlin v hidroponiki . . . . .	6
2.4	Avtomatizacija hidropončnih sistemov . . . . .	6
2.5	Modeliranje rasti rastlin . . . . .	7
2.6	Pregled obstoječih komercialnih in nekomercialnih rešitev . . .	8
<b>3</b>	<b>Izgradnja avtomatiziranega rastlinjaka</b>	<b>9</b>
3.1	Vzpostavitev zahtev za rastlinjak . . . . .	9
3.2	Izgradnja omare in infrastrukture . . . . .	11
3.3	Vodna regulacija . . . . .	13
3.4	Regulacija okoljskih parametrov . . . . .	16
3.5	Zajem in obdelava fotografij rastlin . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Metode adaptivne regulacije</b>	<b>25</b>
4.1	Opis oblike podatkov in nastavitvev hidroponičnega rastlinjaka	26
4.2	Priprava podatkov za modeliranje . . . . .	29
4.3	Izgradnja modelov . . . . .	32

## CONTENTS

4.4	Iskanje optimalnih parametrov . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Prilagajanje sistema z eksperimenti</b>	<b>43</b>
5.1	Eksperimenti z ekspertnimi nastavitvami . . . . .	44
5.2	Podatki zbrani z eksperimenti . . . . .	45
5.3	Zaprtozančni eksperimenti . . . . .	49
<b>6</b>	<b>Sklepne ugotovitve</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Težave pri zaznavanju rasti</b>	<b>59</b>
A.1	Vihanje in obračanje listov . . . . .	59
A.2	Razrast podlage z algami . . . . .	60
A.3	Različni pogoji glede na mesto v pladju za vzgojo rastlin . . .	61

# Seznam uporabljenih kratic

kratica	angleško	slovensko
<b>SPA</b>	speaking plant approach	pristop govorečih rastlin
<b>EC</b>	electrical conductivity	električna prevodnost
<b>LED</b>	light emitting diode	svetleča dioda





# Povzetek

**Naslov:** Analiza rasti v pametnem hidroponičnem sistemu

Vzgoja rastlin s hidroponiko ima v primerjavi s konvencionalnim pristopom številne prednosti: rastline hitreje zrastejo na manjši površini in z manjšo porabo vode. Hidroponični sistemi so v industriji že precej razširjeni, nastopajo v obliki kompleksnih specializiranih sistemov. Za domače uporabnike je hidroponični sistem ponavadi preveč poenostavljen in neoptimalen ali pa prezahteven za upravljanje. Kot rešitev na težavo domačega uporabnika, je bil izdelan hidroponični sistem, ki je po zmožnostih kompleksen, po zahtevnosti upravljanja pa preprost, saj za naloge upravljalca poskrbi logika v vgrajenem sistemu. Izdelan sistem je zmožen povsem avtomatske regulacije dejavnikov, rast rastlin pa spremlja z zajemom fotografij posamičnih rastlin iz ptičje perspektive. Sistem enkrat dnevno zajame fotografije, iz njih izlušči listno površino in poišče najbolj optimalne nastavitve za rast. Za iskanje optimalnih nastavitvev je bila izdelana adaptivna programska oprema, ki uporablja dvostopenjski sistem strojnega učenja. V prvi stopnji se z uporabo nevronske mreže in zajetih preteklih podatkov zgradi model rasti rastline v odvisnosti od nastavitvev hidroponičnega sistema. V drugi stopnji se preišče prostor nastavitvev hidroponičnega sistema z uporabo genetskega algoritma. Najboljše nastavitve glede na trenutno stanje rastlin se uveljavijo. Učinkovitost implementirane adaptivne regulacije je bila, z izvajanjem eksperimentov, primerjana z učinkovitostjo vzgoje rastlin z ekspertnimi nastavitvami. Ob primerjavi najboljših eksperimentov, se je pridelek, v prid adaptivne regulacije, povečal za 13 %, odstotek rasti pa za faktor 2.

---

## Ključne besede

*hidroponika, hidroponični sistem, rastlinjak, adaptivni sistem, nevronska mreža, genetski algoritem, strojno učenje, aeroponika, solata, vgrajeni sistem*

# Abstract

**Title:** Smart hydroponic system growth analysis

Hydroponic approach to growing plants has many benefits over conventional approach, such as: plants grow faster on smaller area and require less water. Hydroponic system usage in industry is quite well established, however, these systems are usually very specialized and complex. Home users can therefore mostly choose between oversimplified suboptimal or overly demanding hydroponic systems. As a solution to this problem a hydroponic system was designed which has all the capabilities of the complex systems but is simple for managing since it comes with integrated logic that takes over most of the managing tasks. The designed system is capable of fully automated regulation of system parameters and is able to track plant growth by taking bird's-eye view pictures of each plant separately. Once a day the system will take pictures of all plants and extract leaf area from them. After that it will proceed to find optimal growth settings for the hydroponic system. In order to do so, a special adaptive software was developed that uses two-level machine learning mechanism. On the first level, it uses neural network and gathered data to create model of plant growth based on hydroponic system settings. On the second level the hydroponic settings space is searched using genetic algorithm. Settings that promise the most growth for the plants currently in the system are applied. Plant growth under the developed adaptive regulation software was compared to growth achieved through expert settings in a series of experiments. Comparison of best experiments revealed that adaptive regulation resulted in the final leaf area increase of 13

---

% and plant total growth percentage increase by a factor of 2.

## **Keywords**

*hydroponics, hydroponic system, garden, adaptive system, neural network, genetic algorithm, machine learning, aeroponics, lettuce, embedded system*

# Poglavje 1

## Uvod

Vzgoja rastlin na hidroponični način nam v primerjavi s konvencionalnim pristopom prinaša številne prednosti: omogoča nam vzgojiti rastline v krajšem času, na manjši površini in z manjšo porabo vode in hranil [2]. V okviru magistrskega dela se bomo omejili na hidroponično vzgojo rastlin, kjer je celotno okolje umetno oziroma laboratorijsko, kar pomeni, da ne uporabljamo sončne svetlobe za vzgojo rastlin ampak rastline vzgajamo pod namenskimi lučmi. Tovrstni hidroponični sistemi so v industriji že precej razširjeni, nastopajo pa v obliki kompleksnih in močno specializiranih sistemov. V magistrski nalogi pa se bomo posvetili hidroponičnim sistemom v manjšem obsegu, primernim za domačo uporabo. Domači uporabniki, ki želijo pridobiti hidroponični sistem se običajno odločajo med zelo poenostavljenim hidroponičnim sistemom, ki je dostopen na trgu, ter med izdelavo lastnega sistema oziroma nabavo bolj profesionalno usmerjenega sistema. V primeru nabave poenostavljenega sistema gre običajno za rešitev, ki je preprosta za uporabo, vendar nikoli ne dosega optimalne rasti rastlin. V primeru nabave kompleksnejšega sistema ali izgradnje lastnega, pa uporabniki spoznajo, da vzgoja rastlin s takšnim sistemom ni tako preprosta. Za vzgojo rastlin je potrebno znanje in izkušnje, ki terjajo veliko časa. Za vzgojo rastlin moramo namreč uravnavati kar nekaj parametrov hidroponičnega sistema, ki so odvisni tudi od zunanjih dejavnikov, faze rasti in vrste rastline. V magistrski nalogi bomo tako iskali rešitev,

ki nam bo omogočila, da kompleksen in napreden hidroponični sistem uporabljamo tako preprosto kot najenostavnejšega na trgu. To bomo dosegli tako, da bomo popoln nadzor nad vsemi parametri hidroponičnega sistema prepustili umetni inteligenci vgrajeni v rastlinjak.

V sklopu magistrske naloge smo izdelali hidroponični rastlinjak, ki je sposoben uravnavati okolje glede na podane nastavitve. Dogradili smo ga s strojno in programsko opremo, ki mu omogoča da izrabja pristop govorečih rastlin (*angleško Speaking Plant Approach*), kar poenostavljeno pomeni, da je zmožen svoje nastavitve spreminjati glede na odzive rastlin. Kot vhodni podatek za odziv rastlin smo uporabili kamero, ki nam vsak dan priskrbi sliko vsake posamične rastline v hidroponičnem sistemu. Za prilagajanje nastavitvev pa smo uporabili dvostopenjski sistem strojnega učenja. V prvi stopnji iz preteklih podatkov o rastlinah zgradimo model na osnovi nevronske mreže. Zgrajen model uporabimo v drugi stopnji, kjer z uporabo genetskega algoritma poiščemo trenutne optimalne nastavitve.

V poglavju 2 bomo spoznali teoretično ozadje magistrske naloge. Spoznali bomo osnove hidroponike ter naredili kratek pregled raziskav iz področja rasti rastlin v hidroponiki, avtomatizacije hidroponičnih sistemov in modeliranja rasti. V poglavju 3 bo predstavljena izgradnja hidroponičnega sistema za potrebe magistrske naloge. Predstavili bomo tako strojno kot programsko plat izdelave. V poglavju 4 bomo podrobno razložili metode, ki smo jih uporabili za doseg adaptivne regulacije hidroponičnega sistema z uporabo pristopa govorečih rastlin. Zbrane podatke ter rezultate eksperimentov pa bomo predstavili v poglavju 5.

## Poglavje 2

# Teoretično ozadje in dosedanje raziskave

V tem poglavju bomo na kratko predstavili teoretično in znanstveno zaledje magistrskega dela. Poleg osnov delovanja hidroponičnih sistemov in njihove avtomatizacije, bomo predstavili tudi raziskave s področja rasti rastlin in njihovih odzivov na različne nabore dejavnikov. Na koncu pa bomo predstavili še teoretičen pristop k modeliranju rasti rastlin in naredili kratek pregled relevantnih komercialnih in nekomercialnih rešitev na trgu.

### 2.1 Hidroponika

Hidroponika je način vzgoje rastlin, ki se od konvencionalne vzgoje najbolj razlikuje po tem, da za vzgojo ne uporabljamo prsti, temveč mineralna hranila dovajamo raztopljena v vodi. Hidroponični način vzgoje rastlin rešuje precej problemov industrijske pridelave rastlin, saj je takšna vzgoja zaradi zelo natančnega dovajanja vode in hranil direktno h koreninam in lažjega nadzora, precej bolj varčna [3]. Primerjava opisana v [2] je ugotovila, da hidroponična vzgoja rastlin porabi le 8 % vode, ki je potrebna za enak pridelek z uporabo konvencionalnega pristopa. Pridelek pa se poveča za kar enajstkrat, če primerjamo rezultate vzgoje na enako veliki površini. Vse pri-

merjane količine so na letni ravni. Obstaja veliko različnih podzvrsti hidroponične vzgoje, vsem pa je skupno, da morajo biti korenine rastline v stiku z vodno raztopino mineralnih hranil, ki ji bomo zaradi lažjega izražanja rekli kar voda s hranili. Odvisno od zasnove sistema se uporabljajo različni rastni mediji (običajno taki, ki sami po sebi ne zagotavljajo hranil), kot na primer kamena volna, pesek, ekspandirana glina, perlit in podobni. Medij se uporablja predvsem za oporo rastline in korenkega sistema ter v nekaterih primerih za boljšo distribucijo hranil. Obstaja kopica vej hidroponike, ki se v glavnem razlikujejo glede na obliko hranil in glede na način njihovega dovajanja. Na kratko bomo predstavili tri najpopularnejše veje hidroponike. Pred tem pa velja omeniti, da je za hidroponični sistem zelo pomembno, da poleg dovajanja hranil koreninam tudi omogoči dostop do zraka, natančneje do kisika in do dušika. Rastlina potrebuje dušik za rast, kisik pa je potreben za preprečevanje gnitja korenin [4].

- **Tehnika filma hranil** (*angleško Nutrient film technique*)[5] rastlinam zagotavlja hranila s pomočjo tankega sloja vode s hranili, v katero segajo korenine. Običajno rastline potrebujejo začetni medij, da odženejo dovolj dolge korenine, da dosežejo film hranil na dnu posode. Zelo tanka plast toka hranil je zelo pomembna, saj to rastlinam omogoči dostop do kisika.
- **Plima in oseka** (*angleško Ebb and Flow*)[6] je pristop, ki temelji na ideji, da v nastavljenih intervalih koreninski sistem poplavimo z vodo s hranili, potem pa pustimo da odteče. S tem omogočimo rastlinam dostop do kisika v obdobjih oseke. Nekatere rastline, kot na primer paradižnik, se tudi zelo dobro odzovejo na menjavanje odsotnosti in prisotnosti hranil. Odsotnost hranil namreč vzpodbudi koreninski sistem, da se še bolj razveji. Prednost tega pristopa je zelo enostavna izvedba, saj zadostujeta primerna posoda z ventilom in vodna črpalka. Glavna težava pa je, da ponavadi potrebujemo precej vode s hranili za obdobje plime.



- **Aeroponika** (*angleško Aeroponics*)[4] je ena najnaprednejših metod za hidroponično vzgojo rastlin, vendar tudi ena najbolj zapletenih. Pri tej metodi uporabljamo vodo s hranili, ki jo pod visokim pritiskom dovajamo do pršilnih šob, nameščenih pod koreninami. Korenine periodično pršimo tako, da se nikoli ne izsušijo, a ob enem se na njih tudi nikoli ne nabere večja količina vode. Tak pristop koreninam ves čas omogoča dostop do zraka in hranil. Dodatna prednost te metode je, da so zaradi visokega pritiska vodne kapljice vode s hranili zelo majhne, to je v rangi od 20 do 50 mikrometrov. Mikro kapljice od korenin izzovejo pospešeno rast zelo drobnih koreninic, ki imajo zelo dobro razmerje med težo in površino, namenjeno vsrkavanju hranil. Aeroponični sistem ima tudi najmanjšo porabo vode in hranil v primerjavi z drugimi hidroponičnimi sistemi.

## 2.2 Pristop govorečih rastlin

Pristop govorečih rastlin (*angleško Speaking Plant Approach*, kratica *SPA*) je konceptualni pristop k vzgoji rastlin, za katerega velja, da morajo biti optimalni pogoji za vzgojo rastline osnovani na fiziološkem stanju rastline. Koncept definira, da je za ugotavljanje optimalnih pogojev za vzgojo rastline prvi korak ugotavljanje trenutnega fiziološkega stanja žive rastline [7]. V industriji je pogosto uporabljen način za ugotavljanje fiziološkega stanja rastlin uporaba fluorescentne kamere za ugotavljanje količine klorofilne aktivnosti, ki je dober pokazatelj zdravja rastline [7]. Obstaja več raziskav, kjer se za ocenjevanje stanja rastline uporablja le običajna kamera s pomočjo katere naredimo nedestruktivne meritve rastline. Preprost primer spremljanja višine rastline s kamerami je opisan v [8]. Avtorji opišejo programsko opremo, ki je s pomočjo spremljanja višine zaznala odziv rastlin in potrdijo njeno delovanje z izvedbo treh eksperimentov. Naprednejša uporaba običajne kamere za določitev stanja rastline pa je predstavljena v [9]. V delu avtorji poročajo o uporabi dveh kamer v industrijskem rastlinjaku, kjer

so s pomočjo računalniške podpore spremljali metrike rasti rastlin. Dve kameri sta omogočili izrabo tridimenzionalnega računalniškega vida, s pomočjo katerega so rastlinam določevali listno površino, višino in oceno njene mase.

## **2.3 Vpliv dejavnikov na rast rastlin v hidroponiki**

Hidroponični sistem ima več različnih variabilnih parametrov. Najpomembnejši so: količina svetlobe, temperatura zraka, kislost vode s hranili, ter koncentracija hranil v njej. Odvisno od izvedbe hidroponičnega sistema, je lahko zelo pomemben parameter tudi frekvenca dovajanja hranil.

Odziv rastlin na kislost vode s hranili in koncentracijo hranil v njej je podrobneje opisan v [10]. Avtor je ugotovil, da je med parametroma manjša odvisnost, oziroma, da parametra nista povsem linearno ločena. Če primerjamo vpliv frekvence dovajanja hranil, koncentracije hranil in kislosti vode s hranili na rast, ugotovimo, da je frekvenca dovajanja hranil zelo močno odvisna od vpliva koncentracije hranil v vodi s hranili [11]. Če pa koncentracijo hranil v vodi s hranili primerjamo z najpomembnejšima okoljskima dejavnikoma, temperaturo zraka in količino svetlobe, ugotovimo, da imata okoljska dejavnika največji vpliv, obstaja pa delna odvisnost med vsemi tremi parametri [12, 13].

## **2.4 Avtomatizacija hidropončnih sistemov**

Na temo avtomatizacije hidroponičnih rastlinjakov obstaja veliko raziskav. V članku [14] lahko preberemo, kako so avtorji izdelali sistem za sprotno uravnavanje kislosti in koncentracijo hranil glede na zahtevane vrednosti, ki jih nastavimo. V [15] avtorji poročajo o naprednejši implementaciji regulacije, kjer poleg količine hranil avtomatsko merijo in regulirajo tudi posamezne osnovne hranilne elemente: dušik, kalij in fosfor. V članku [16] pa je bil izde-

lan kontrolni sistem za pripravo mešanice hranil, ki je bil, na podlagi učnih podatkov, zmožen napovedati optimalne nastavitve hidroponičnega sistema v realnem času.

## 2.5 Modeliranje rasti rastlin

Rast rastlin je biološki proces, ki ga lahko opišemo z zakoni matematike, fizike in kemije. V grobem k modeliranju lahko pristopimo na dva različna načina, bodisi z izgradnjo modela na podlagi merjenja in opazovanja rastline, bodisi pa z matematičnim opisom fizikalnih in kemičnih procesov, ki se odvijajo med rastjo rastline.

Primer prvega pristopa je opisan v [17], kjer so avtorji zgradili model na osnovi nevronske mreže na podlagi zbiranja višine rastline. Poročajo o napaki med 2,5 % in 9,7 %.

Pristop modeliranja rasti rastline z matematičnim opisom fizikalnih in kemičnih procesov, lahko storimo na različnih nivojih granularnosti. V [18] so Paine in sodelavci raziskali univerzalne matematične metode za modeliranje rasti rastline le na osnovi njene mase. Opisujejo in primerjajo preproste linearne metode, eksponentni zakon in tudi druge naprednejše metode, kot na primer nelinearna asimptotična metoda imenovana Gompertz. Vsem metodam je skupno, da od nas zahtevajo, da določimo končno maso rastline, njena rast pa je funkcija trenutne mase in časa. Bolj granularen pristop od univerzalnega matematičnega modeliranja je dinamično modeliranje rasti rastline, katerega primer sta v [19] opisala avtorja Bessonov in Volpert. Osredotočita se na vrsto tkiva v rastlinah, imenovanega meristem, ki je edino tkivo v rastlinah, ki se lahko deli. Z upoštevanjem njegovih karakteristik, modeliranjem toka hranil, toka hormonov v rastlinah in še nekaterih drugih procesov zgradijo matematični model rasti rastline. Rezultat prispevka je matematična simulacija rasti rastline. Še bolj granularen pristop pa je procesno modeliranje rasti rastlin. Pri njem se osredotočimo na zelo nizkonivojske procese, ki potekajo v rastlinah, kot so rastlinski sistemi za srkanje vode, podrobno mo-

deliranje fotosinteze in porazdeljevanje ogljika po tkivih rastline. Procesno modeliramo tudi topologijo rastline oziroma razvoj njenih organov. Najbolj napredni modeli se spustijo do nivoja modeliranja procesov v posameznih celicah. Primer takega modela je model *EcoMeristem*, opisan v [20].

## 2.6 Pregled obstoječih komercialnih in nekomercialnih rešitev

Na trgu je dostopnih nekaj produktov, ki so že zmožni različnih oblik samoregulacije. ResponzIO [21] je regulator za popolni nadzor hidroponičnega rastlinjaka, vendar so nastavitve ročne. Iz področja kompletnih naprav lahko omenimo napravi Plantui [22] in Root [23], ki sta zmožni regulirati periodo osvetljevanja z vgrajeno lučjo. Nekoliko naprednejši pa je izdelek Niwa [24], ki omogoča regulacijo temperature, vlage, periode osvetljevanja in frekvence dovajanja hranil. Vsi trije izdelki se zanašajo na univerzalno formulo hranil in kislosti vode in ne podpirajo regulacije na tem področju. Za doseg dobrih rezultatov pa izdelek Niwa uporablja znanje kupcev, ki so zmožni predlagati (boljše) nastavitve za posamezne rastline.

Omeniti velja tudi program Ameriške univerze *Massachusetts Institute of Technology* imenovan *Open Agriculture* [25]. V tem programu univerza z odprtokodno licenco (*angleško Open Source*) deli veliko informacij ter ponuja celotne načrte za izvedbo domačega ali industrijskega hidroponičnega sistema. V načrtu je zajeta vsa strojna oprema s predlogi dejanskih produktov primernih za vgradnjo in vsa programska oprema za regulacijo dejavnikov hidroponičnega sistema vključno s preizkušenimi nastavitvami za vzgojo posamezne vrste rastlin.

## Poglavje 3

# Izgradnja avtomatiziranega rastlinjaka

V tem poglavju bomo opisali zasnovo in izgradnjo avtomatiziranega hidroponičnega rastlinjaka, ki smo ga uporabili za namene magistrske naloge. Najprej bomo opisali zahteve in osnovne odločitve (kot na primer izbira platforme in tipa hidroponičnega sistema), ki smo si jih zastavili oziroma jih sprejeli še pred izgradnjo. Zatem pa si bomo v ločenih sklopih pogledali, kako smo konstrukcijsko in programsko pripravili infrastrukturo za rastlinjak ter vgradili vodno regulacijo, regulacijo okolja ter celoten sistem za zajem in obdelavo fotografij rastlin.

### 3.1 Vzpostavitev zahtev za rastlinjak

Osnovna zahteva je, da je rastlinjak programabilen in voden z vgrajenim sistemom. Zaradi dobre razširjenosti in dobre podpore skupnosti, ter na drugi strani solidne zmogljivosti smo za osnovni krmilni sistem izbrali razvojno ploščico Raspberry Pi 3 [26]. Zaradi velike množice vhodno-izhodnih priključkov in potrebe nekaterih senzorjev in kontrolerjev po natančnem realno-časovnem krmiljenju, smo vgrajeni sistem razširili tudi z razvojno ploščico iz družine Arduino, natančnejše Arduino Mega 2560 [27].

### 10POGLAVJE 3. IZGRADNJA AVTOMATIZIRANEGA RASTLINJAKA

Med različnimi vrstami hidroponičnih sistemov opisanih v poglavju 2, smo se odločili za izgradnjo aeroponičnega sistema, saj velja za enega najboljših pristopov k hidroponiki, ter omogoča zelo natančno računalniško krmiljenje. Z izbrano platformo in tipom hidroponičnega sistema smo definirali naslednje regulativne zmožnosti sistema, za katere zahtevamo, da jih sistem avtomatsko regulira glede na namenske nastavitve, ki jih vpišemo v programsko opremo vgrajenega sistema:

- dovajanje vode s hranili mora biti kontrolirano glede na nastavitve,
- koncentracija mineralnih hranil v vodi s hranili ter njena kislost morata biti samedejno uravnavani glede na nastavitve (v obe smeri),
- sistem mora samodejno vklopiti in izklopiti luči glede na nastavitve,
- sistem mora glede na nastavitve skrbeti za prezračevanje.

Dodatno imamo še zahteve s področja zbiranja podatkov. Sistem mora:

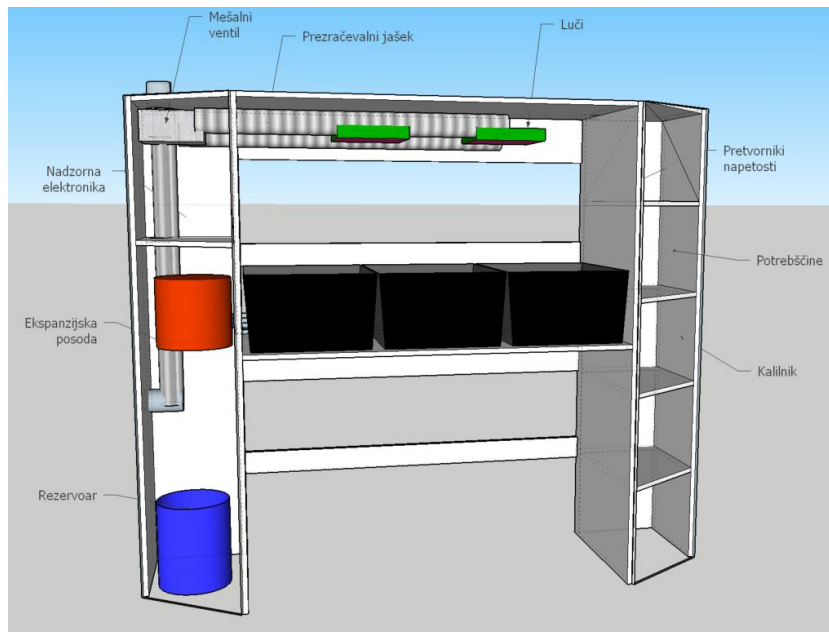
- v smiselnih intervalih zbirati podatke o koncentraciji hranil v vodi s hranili in o njeni kislosti,
- v smiselnih intervalih beležiti temperaturo zraka,
- beležiti vse dovajanja hranil ter njihova trajanja,
- beležiti vklope in izklope luči,
- beležiti katere rastline trenutno rastejo v rastlinjaku, kdaj so bile posajene in kdaj požete,
- zabeležiti razlog za žetev rastline, v kolikor gre za bolezen, nezdravje ali propad rastline,
- enkrat dnevno narediti fotografije vsake posamične rastline in jih shraniti.

Dodatne zahteve:

- prostor v rastlinjaku, kjer rastejo rastline, mora biti zaprt, da preprečimo dostop zunanje (nekontrolirane) svetlobe in morebitnih škodljivcev v sistem,
- prostor, kjer se nahajajo korenine, mora biti svetlobno izoliran, da korenine ne pridejo v stik s svetlobo,
- želimo preprost uporabniški vmesnik za spremljanje dogajanja v hidroponičnem sistemu,
- želimo, da ima sistem kapaciteto za vsaj 30 rastlin.

## 3.2 Izgradnja omare in infrastrukture

Omaro, v katero smo namestili rastlinjak, smo izdelali iz lesa. Izdelali smo jo nekoliko večjo, kot bi bilo potrebno, da bi pustili nekaj prostora za morebitne naslednje eksperimentalne razširitve. Na sliki 3.1 je predstavljen 3D model načrta omare. Stolpični prostor omare smo razdelili na 3 razdelke. Osrednji, največji razdelek, je prostor za vzgojo rastlin (predstavljen tudi na sliki 3.3), kjer se tudi nahajajo 3 posode za vzgojo rastlin, v katere razpršujemo vodo s hranili. Vsaka od treh posod za vzgojo rastlin je pokrita s posebnim pladnjem, ki ima 15 odprtin za namestitvev rastlin. Pladnji so bele barve za lažjo kasnejšo obdelavo fotografij. Vsaka posoda za vzgojo rastlin ima odtok speljan nazaj do glavnega rezervoarja. Nad rezervoarjem pa se nahaja tlačna črpalka, ki iz njega črpa vodo s hranili in jo pod pritiskom 8 bar shrani v ekspanzijsko posodo. Sestava pravkar opisanega sklopa je razvidna tudi na sliki 3.2. Ekspanzijska posoda je preko električnih ventilov povezana do šob, ki se nahajajo znotraj posod za vzgojo rastlin. V prostoru za vzgojo rastlin sta nad posodami postavljeni zračni cevi za odvod in dovod zraka, ki preko mešalnega ventila vodita ven iz omare. Pri načrtovanju omare smo se, kljub temu, da ne pričakujemo puščanja vode ali pretirane vlage, držali pravil, da



**Slika 3.1:** 3D model omare rastlinjaka z osnovnimi komponentami.

vso električno napeljavo vodimo po stropnem delu, vso vodno pa kar najbližje tlom.

### 3.2.1 Infrastrukturni opis programske opreme

Na razvojno ploščico Raspberry PI 3 smo namestili distribucijo Linux Raspbian [28]. Odločili smo se, da programsko opremo spišemo v okolju .NET, v programskem jeziku C#. Za izvajanje programa v Linux okolju zato potrebujemo odprtokodno izvršilno okolje Mono [29]. Za dostop do strojne opreme razvojne ploščice Raspberry Pi 3 pa smo spisali nekaj preprostih programov v jeziku C, ki jih s parametri pokličemo iz glavnega programa. Za podatkovno bazo uporabljamo MySQL. Za glavno platformo .NET se nismo odločili le zaradi poznavanja, temveč tudi zato, ker omogoča dober način deljenja programske logike z dinamičnimi knjižnicami (*DLL*) med različnimi programi. V našem primeru imamo tri programe: spletno aplikacijo in dva procesa, ki tečeta v ozadju. Spletno aplikacijo uporabljamo za pregled dogajanja v



hidroponičnem sistemu v obliki dnevniških zapisov, za pregled rastlin in njihovih fotografij ter za pregled aktualnih nastavitev sistema. V ozadju tečeta dva programa. Prvi skrbi za osnovne življenske funkcije hidroponičnega sistema, kot so dovajanje hranil, regulacija vode, regulacija okolja in zajemanje fotografij. Drugi program pa skrbi za procesiranje fotografij in vso dodatno logiko v zvezi z iskanjem optimalnih nastavitev, ki jo bomo spoznali v poglavju 4.

### 3.3 Vodna regulacija

Na začetku poglavja smo že opisali infrastrukturne vodne povezave. Te sklenejo krog v rezervoarju, ko se voda s hranili, ki je bila pod pritiskom izbrizgana iz šob, vrne v rezervoar. Za konstanten pritisk skrbi tlačna vodna črpalka, ki se avtomatsko regulira s tlačnim stikalom. V naslednjih dveh razdelkih si bomo natančneje pogledali, katere strojne elemente še potrebujemo za regulacijo vode s hranili, ter kako s programsko opremo dosežemo regulacijo. Regulirati moramo dovajanje hranil, uravnavanje kislosti vode s hranili in koncentracijo hranil v njej. O stanju vseh treh omenjenih regulacij moramo tudi zbirati podatke.

#### 3.3.1 Strojna oprema

Tlačna črpalka nam že zagotovi potreben pritisk vode s hranili, zato moramo za potrebe dovajanja hranil le odpreti električni ventil, ki odpre vodno pot med akumulirano vodo s hranili pod pritiskom in razprševalnimi šobami. Na voljo imamo en električni ventil za vsako od treh posod za gojenje rastlin. Za vsak električni ventil potrebujemo še dodatni rele in zunanje napajanje preden ga lahko povežemo na razvojno ploščico.

Za uravnavanje kislosti vode s hranili in koncentracijo hranil v njej konceptualno potrebujemo tri elemente: merilnik trenutne vrednosti obeh količin, mehanizem za zviševanje vrednosti in mehanizem za zniževanje vrednosti. Za uravnavanje kislosti vode s hranili imamo za merjenje trenutne kislosti v

rezervoarju na voljo elektronsko sondo pH, ki je zmožna natančno odčitati trenuten nivo kislosti. Za zniževanje vrednosti pH imamo na voljo dodatno kapilarno črpalko, ki lahko dovaja namensko koncentrirano sredstvo za zniževanje nivoja pH v rezervoar. Za zviševanje nivoja pH pa nimamo tako učinkovitega regulacijskega mehanizma, saj imamo na voljo le dodaten rezervoar s čisto vodo brez dodatkov in namensko črpalko, ki vodo s hranili v rezervoarju razredči. Čista voda iz pipe je običajno bazična, zato zviševanje nivoja pH ni potrebno. Opisan sklop je predstavljen tudi na sliki 3.2.

Za uravnavanje koncentracije hranil v vodi s hranili imamo na voljo zelo podobno strojno opremo: merilno sondo električne prevodnosti tekočine v rezervoarju (električna prevodnost tekočine na dolžinsko enoto je najbolj standardna oblika merjenja koncentracije hranil v vodi), kapilarno črpalko, ki je zmožna dovesti koncentrirano mešanico hranil v rezervoar, ter že omenjen sistem za razredčevanje vode v rezervoarju, s katerim dosežemo nižanje koncentracije hranil v vodi.

### **3.3.2 Programska oprema**

Za regulacijo dovajanja hranil v podatkovni bazi vodimo po eno nastavitvev razmaka med pršenji in eno nastavitvev trajanja posameznega pršenja za vsako posodo z rastlinami. Programska logika zagotovi, da se ob nastavljenih intervalih posamezni električni ventili odpirajo in zapirajo. Vsako pršenje je zabeleženo v podatkovno bazo programa.

V nastavljenem intervalu (običajno nekajkrat urno) programska oprema poskrbi za merjenje lastnosti vode s hranili. Izmerjene vrednosti kislosti in koncentracije hranil se zabeležijo v podatkovno bazo. V kolikor so vrednosti izven meja tolerance, če jih primerjamo z nastavljenimi, sprožimo regulativni odziv. Regulativni odziv je bodisi dodajanje koncentriranega sredstva za zniževanje kislosti tekočine, bodisi dodajanje koncentriranih mineralnih hranil, ali pa redčenje vode v rezervoarju. Intenziteta regulativnega odziva je odvisna od tega, kolikšna je razlika med izmerjeno vrednostjo in nastavitvijo.



**Slika 3.2:** Pogled na vodno regulacijski sistem ob strani rastlinjaka. Na vrhu opazimo od leve proti desni: ekspanzijsko posodo v modri barvi, vodni filter in tlačno stikalo. V območju, kjer se nahaja srednja kotna polica opazimo še eno ekspanzijsko posodo ter rahlo pod njo tlačno črpalko, na skrajni desni pa rezervno tlačno črpalko. Na spodnji kotni polici opazimo dva majhna rezervoarja s koncentrirano raztopino sredstva za nižanje nivoja pH in koncentriranih mineralnih hranil, tik nad njima pa kapilarni črpalki (na sliki dejansko vidna le ena). V spodnjem delu slike opazimo velik glavni rezervoar za vodo in dodaten manjši rezervoar za svežo vodo.

## 3.4 Regulacija okoljskih parametrov

Z regulacijo okoljskih parametrov imamo v mislih regulacijo temperature, prezračevanja ter svetlobe oziroma namenskih luči. Prezračevanje je nujno potrebno za ugodno rast rastlin. Pri regulaciji temperature pa smo omejeni le na mešanje zraka, ki je v rastlinjaku, z zrakom zunaj rastlinjaka. V času *dneva*, takrat ko so luči vklopljene, nam le te predstavljajo vir toplote, ki je bodisi dobrodošla ali pa odvečna. Z mešalnim ventilom lahko reguliramo temperaturo v času vklopljenih luči (ki je sicer običajno v nočnem času, zaradi cenejšega električnega toka). Dodatnih mehanizmov za regulacijo temperature nimamo. V večini primerov je temperatura v prostoru, kjer se nahaja rastlinjak, višja od najbolj optimalnih temperatur za vzgojo solate, ki smo si jo izbrali za testno rastlino (razen ponoči, takrat to lahko kompenziramo s toploto iz luči). Tako prave potrebe po dogrevanju rastlinjaka ni. Hlajenje zraka v rastlinjaku pa je bilo v trenutnem sklopu predrago, preveč težavno in energijsko potratno za izvedbo.

### 3.4.1 Strojna oprema

Za izvedbo prezračevanja in regulacije temperature imamo v prostoru za vzgojo rastlin napeljeni dve zračni cevi, eno za dovod ter eno za odvajanje zraka. Cev za odvajanje zraka iz prostora odvaja zrak skozi namenske luči in preprečuje direktno ogrevanje prostora za vzgojo rastlin. Obe zračni cevi sta preko cevni ventilatorjev speljani v mešalni ventil, ki smo ga izdelali za ta namen. Cevna ventilatorja lahko preko releja programsko vklopljamo in izklopljamo. Mešalni ventil pa sestavljajo dvokrilna vratca, katera lahko premikamo s pomočjo servo motorja. Vratca v mešalnem ventilu lahko povsem razpremo in s tem aktiviramo 100 % notranje kroženje zraka, kar pomeni da, če imamo vklopljene luči, se bo zrak v prostoru za vzgojo rastlin segreval. Vratca lahko postavimo v katerikoli položaj do drugega ekstremnega položaja, ko so ta sklenjena skupaj. V sklenjenem položaju doteka v notranjost svež zrak iz prostora. Segret in obrabljen zrak pa vračamo nazaj

v prostor. Točki izpusta in zajema zraka sta povsem na drugih mestih rastlinjaka. Servo motorju, ki krmili vratca, lahko programsko nastavimo kot vratc. Na stropu prostora za vzgojo rastlin pa imamo tudi dodatni senzor vlage in temperature.

Za zagotavljanje svetlobe, potrebne za rast rastlin, uporabljamo dve namenski luči. Luči so izvedene v tehnologiji LED (*angleško Light Emitting Diode*) in vsebujejo le namenske modre in rdeče diode LED, za katere je značilno, da sevajo le specifične valovne dolžine svetlobe, ki jih rastline lahko absorbirajo. Vsaka luč porablja približno 100 W moči, ko je vklopljena. Vezavo smo izvedli preko dodatnega releja, da lahko luči vklapljamo in izklapljamo programsko. Večino opisanih elementov je razvidnih na sliki 3.3.

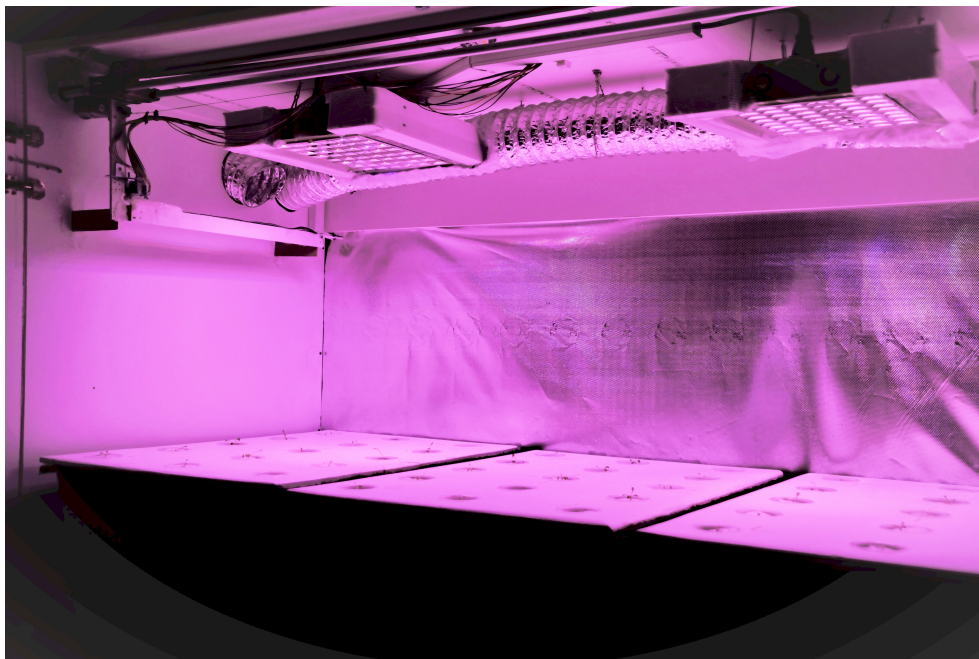
### 3.4.2 Programska oprema

Programska oprema, ki skrbi za zračenje in uravnavanje temperature ob zaagonu vedno postavi vratca na 50 % notranjega kroženja zraka in vklopi oba ventilatorja za prezračevanje. Periodično, v nastavljenem intervalu (običajno nekajkrat urno), program pridobi novo meritev temperature iz temperaturnega senzorja. Meritev primerja z zeleno nastavitvijo in prilagodi mešalni ventil za 10 % hoda vrata v ugodnejšo pozicijo, dokler ne doseže ekstrema. Pri notranjem kroženju je ekstrem postavljen na 90 % notranjega kroženja, saj je pomembno, da kljub skrbi za temperaturo vseeno zagotovimo dotok svežega zraka.

Za vklop luči skrbi programska oprema, ki deluje na podlagi dveh nastavitv: absolutnega časa vklopa luči in trajanja obdobja vklopljenih luči. Ko je dosežen čas vklopa luči, se preko releja luči vklopijo. V tem stanju ostanejo dokler se trajanje obdobja vklopljenih luči ne izteče.

## 3.5 Zajem in obdelava fotografij rastlin

Z namenom, da sistem deluje po pristopu govorečih rastlin, moramo sistemu zagotoviti povratne informacije o rasti rastlin, oziroma njihovem odzivu na



**Slika 3.3:** Prostor za vzgojo rastlin pod prižganimi lučmi. V spodnjem delu vidimo posode za vzgojo rastlin s pripadajočimi pladnji in mladimi rastlinami. V zgornjem delu slike vidimo dva kompleta namenskih luči za vzgojo rastlin, ki ju povezuje odvodni prezračevalni jašek. V levem zgornjem kotu pa opazimo ročico kamere na njeni začetni poziciji. Opazimo tudi vodila in zobato jermenico na stropu prostora, s katerimi se voziček za kamero premika.

nastavljene parametre hidroponičnega rastlinjaka. S tem namenom smo implementirali zajem fotografij vsake rastline posebej. Nato fotografije obdelamo, da izluščimo listno površino, kot je vidna iz ptičje perspektive.

### 3.5.1 Strojna oprema

Prvotno smo želeli implementirati sistem kar se da preprosto s stacionarno kamero in uporabo širokokotne leče. Žal je višina prostora za vzgojo rastlin premajhna da bi vse rastline zajeli v en posnetek, zato smo sistem razširili s sistemom, ki se drsno premika po daljši stranici prostora za vzgojo rastlin. Žal tudi to ni zadoščalo, saj so bile rastline na robu vidnega polja objektiva komajda še na posnetku, kvaliteta pa je bila nezadovoljiva. Zato smo bili prisiljeni sistem še dodatno razširiti z mehanizmom za premik kamere tudi po krajši dimenziji prostora za vzgojo rastlin. Zaradi prostorskih in mehanskih omejitev smo premik kamere po krajši dimenziji implementirali nekoliko nestandardno. Na drseči voziček, ki se premika po daljši stranici prostora za vzgojo rastlin smo pod pravim kotom s tečajem pritrdili ročico za kamero. Nad tečaj pa smo namestili dodatni motor, ki ročici spreminja kot glede na voziček, ki se premika po daljši stranici prostora za vzgojo rastlin.

Za premik po daljši stranici prostora za vzgojo rastlin smo uporabili koračni motor s kompatibilnim kontrolerjem, ki smo priklopili na vgrajeni sistem rastlinjaka. Za voziček smo izdelali vodila iz aluminijastih cevi ter ga vpeli v zobato jermenico. Koračni motor tako poganja zobato jermenico, ki premika voziček po daljši stranici prostora za vzgojo rastlin. Tudi za nad tečaje ročice za premik kamere po krajši stranici prostora za vzgojo rastlin smo namestili koračni motor s kompatibilnim kontrolerjem in ga povezali na vgrajeni sistem.

Uporabili smo originalno kamero Raspberry Pi, saj velja za zelo kvalitetno. Izdelati smo morali le dolg podaljšek ploščatega kabla, ki jo povezuje z razvojno ploščico Raspberry Pi 3. Kabel smo pritrdili na sredini prostora za vzgojo rastlin in izdelali sistem za nošenje in gubanje kabla, takrat ko ta ni popolnoma iztegnjen. To smo dosegli z s pritrditvijo kabla na vrstico z

vzmetnim navijalcem, ki je prav tako pritrjena na voziček. Vgradili smo tudi dodatne bele diode LED, ki jih uporabimo med slikanjem rastlin, saj bi osvetlitev z glavnimi namenskimi lučmi za vzgojo rastlin zagotovila nekontrastno sliko ter nepravilne barve in nam otežila razbiranje listne površine iz posnetkov rastlin.

### 3.5.2 Programska oprema

Za premik kamere z nadzorom koračnih motorjev smo razvili posebno programsko opremo, ki za vse rastline izračuna potrebno lokacijo vozička, ki se premika po daljši stranici prostora za vzgojo rastlin in kota ročice kamere. Nekaj časa smo porabili, da smo sistem povsem umerili. Za vsako posodo za vzgojo rastlin držimo podatke, kolikšen je njen začetni odmik od stranic rastlinjaka, kolikšen je njen odmik do prve vogalne odprtine za posamezno rastlino in kolikšne razmake ima med posameznimi odprtinami. Prav tako imamo vse podatke o dolžini vodila za voziček, ki se premika po daljši stranici prostora za vzgojo rastlin ter o ročici kamere. V programski opremi se zanašamo na začetni položaj obeh elementov, saj algoritem poskrbi, da se na koncu kamera vedno vrne v enak položaj. Ker uporabljamo koračne motorje, je to izvedljivo z veliko natančnostjo, saj se koračni motorji obračajo s konstantnim številom podanih korakov (korak je del obrata, odvisen od tipa motorja).

Algoritem za vsako rastlino določi pozicijo obeh premičnih elementov z uporabo geometričnega izračuna, kot je predstavljeno s psevdokodo 1. Programska oprema pri slikanju poskrbi za to, da se med zajemom fotografije namenske luči za vzgojo rastlin izklopijo ter vklopijo bele luči za zajem fotografij.

Tako zajete slike programska oprema v procesu, ki teče v ozadju obdela. Za obdelavo slike uporabljamo knjižnico Accord.NET [30]. Sliko obdelamo v štirih korakih.

- **Korak 1:** Uporabimo Evklidski barvni filter, ki ga ponuja knjižnica, ter kot vhodni parameter poleg slike podamo tudi tipično zeleno barvo



---

**Algorithm 1** Psevdokoda algoritma za premik kamere

---

```

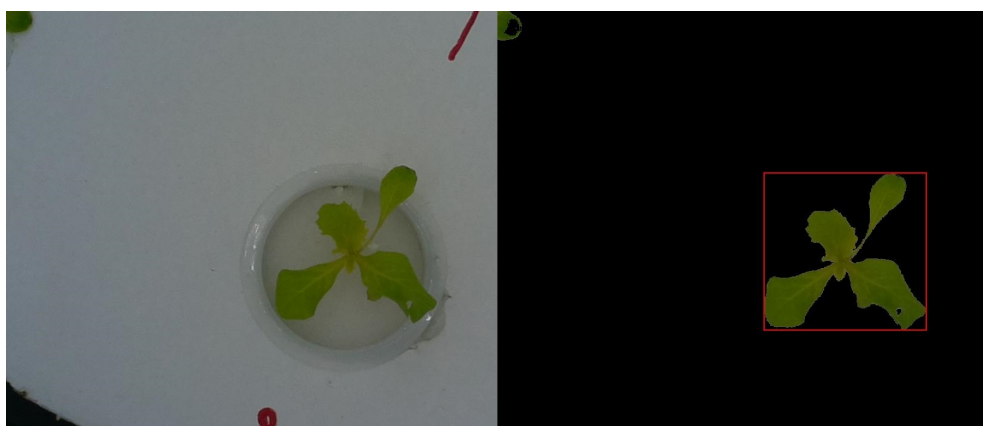
1:  $p \leftarrow posoda$ 
2:  $r \leftarrow rastlina$ 
3: # Izracunaj X in Y koordinate rastline v prostoru za vzgojo rastlin
4:  $x \leftarrow p.OdmikPosodeX + p.OdmikPrveOdprtineX + p.OdmikMedOdprtinamiX * r.OdprtinaX$ 
5:  $y \leftarrow p.OdmikPosodeY + p.OdmikPrveOdprtineY + p.OdmikMedOdprtinamiY * r.OdprtinaY$ 
6: # Izracunaj kot rocice in odmik po daljsi stranici, ki bo posledica tega kota
7:  $kot \leftarrow arccos(y/DolzinaRocice)$ 
8:  $odmikRocicePriKotu \leftarrow DolzinaVodila * sin(kot)$ 
9: # Preveri obe možnosti premika rocice
10: if PreveriPravilnostPozicije( $x + NegativnoPredznaci(odmikRocicePriKotu)$ , PozitivnoPredznaci( $kot$ )) then
11:    $odmikRocicePriKotu \leftarrow NegativnoPredznaci(odmikRocicePriKotu)$ 
12:    $kot \leftarrow PozitivnoPredznaci(kot)$ 
13: end if
14: if PreveriPravilnostPozicije( $x + PozitivnoPredznaci(odmikRocicePriKotu)$ , NegativnoPredznaci( $kot$ )) then
15:    $odmikRocicePriKotu \leftarrow PozitivnoPredznaci(odmikRocicePriKotu)$ 
16:    $kot \leftarrow NegativnoPredznaci(kot)$ 
17: end if
18: # Pristej/odstej odmik, ki ga prinese vrtenje rocice k odmiku vozicka
19:  $x \leftarrow x + odmikRocicePriKotu$ 
20: # Premakni vozicek na izracunano mesto in rotiraj rocico
21:  $PremakniVozicekNaOdmik(x)$ 
22:  $RotirajRocicoNaKot(kot)$ 

```

---

solate. Filter sicer ne tolerira le podane barve temveč tudi podobne barve, še zlasti, če se nahajajo v bližini. Rezultat tega koraka je slika s črnim ozadjem, kjer so vidna le zelena območja.

- **Korak 2:** Izhod prejšnjega koraka podamo algoritmu za iskanje gruč na sliki, ki ga prav tako ponuja knjižnica Accord.NET. Vhodne parametre nastavimo tako, da algoritem ignorira zelo majhne gručice. Rezultat je seznam gruč zelene barve.
- **Korak 3:** Iz seznama gruč iz prejšnjega koraka poiščemo gručo, ki je najbližje sredini fotografije. Včasih se namreč zgodi, da je na fotografiji viden tudi del sosednje rastline. Sredinska gruča je zato naša osnova. Sredinsko gručo iterativno spajamo z ostalimi gručami, ki so zelo blizu. Parametre, ki določajo kaj je smiselna oddaljenost, da dve gručici še smatramo za eno rastlino smo poiskali eksperimentalno.
- **Korak 4:** Iz slike odstranimo vse gručice, ki niso sredinske ali dovolj blizu sredinski. Listno površino izračunamo kot število preostalih ne-črnih slikovnih točk in jih z umerjeno formulo pretvorimo v kvadratne centimetre. Rezultat smo predstavili na sliki 3.4.



**Slika 3.4:** Primerjava izreza surove zajete slike rastline ter obdelane slike. Sistem za zaznavo listne površine izloči (počrni) vse nepomembne slikovne pike. Ostanejo le slikovne pike, ki predstavljajo listno površino. Sistem za zaznavo listne površine obdelano sliko shrani za kasnejši pregled ter z rdečo obrobo pokaže, katere gruče zelenih slikovnih pik je upošteval pri izračunu listne površine rastline.



## Poglavje 4

# Metode adaptivne regulacije

V tem poglavju bomo opisali kako smo rastlinjak nadgradili s ciljem, da bi vgrajeni sistem v rastlinjaku, glede na odzive rastlin, sam izbral najbolj optimalne nastavitve. Nastavitve, ki smo jih vnašali v sistem pred implementacijo adaptivne regulacije, bomo, glede na večletne izkušnje z upravljanjem in izgradnjo hidroponičnih sistemov, smatrali kot ekspertne nastavitve. Cilj adaptivne regulacije je, da v dani situaciji poišče boljše ali pa vsaj enako dobre nastavitve od ekspernih nastavitvev.

V poglavju 2 smo v prvih nekaj pregledih relevantnih znanstvenih člankov spoznali, da so odzivi rastlin na določen dejavnik precej dobro raziskani. Opazili pa smo tudi, da v kolikor spremljamo več dejavnikov, obstajajo med njimi odvisnosti. Ker je teh dejavnikov kar precej, na nekatere pa tudi nimamo vpliva oziroma imamo le delni vpliv (kot na primer v našem primeru na temperaturo), se preiskovalni prostor za iskanje optimalnih nastavitvev zelo hitro povečuje z vsakim dejavnikom. Dejavnike bomo od te točke naprej imenovali nastavitve hidroponičnega sistema, saj jih lahko nastavljamo (z izjemo temperature, kjer to drži le deloma). Glede na velik preiskovalni prostor optimalnih nastavitvev hidroponičnega sistema, lahko nemudoma izločimo pristop z iskanjem optimalnih nastavitvev na živih rastlinah. Iteracije bi bile veliko prepočasne, odzivi rastlin prav tako prepočasni (včasih celo akumulativni). Zato je bolj smiselno, da optimalne nastavitve hidroponičnega sistema iščemo

na modelu. Model bomo zgradili na vseh do sedaj zbranih podatkih in ga poizkusili naučiti odziva, ki bi čim bolj ustrezal odzivu pravih rastlin. Takšen pristop, kjer neodvisne spremenljivke nastavljammo glede na napovedi modela, se imenuje modelno prediktivno vodenje (*angleško Model Predictive Control*) [31] in se pogosto uporablja, na primer v kemični industriji.

Nad dobrim modelom lahko poženemo optimizator, ki bo preiskal prostor nastavitvev hidroponičnega sistema in predlagal nastavitve, ki bodo glede na stanje trenutnih rastlin dale najboljši odziv. Najboljše nastavitve bomo zatem v rastlinjaku uveljavili za 24 ur. Po 24 urah pa bomo dobili že prvo povratno informacijo o tem, ali se napovedani odziv modela sklada z dejanskim odzivom rastlin. V vsakem primeru bomo novo zbrane podatke vključili v nov model, s katerim bomo zopet poiskali najbolj optimalne nastavitve za naslednjih 24 ur. V kolikor je bil dejanski odziv rastlin na podane nastavitve zelo drugačen od napovedanega, bodo novi podatki v modelu pripomogli k izboljšanju točnosti skozi nekaj iteracij.

Za izgradnjo modela bomo uporabili model nevronske mreže, za optimizator pa genetski algoritem. Podobno, kot sta to storila T. Morimoto, in Y. Hashimoto v [32]. V naslednjih podpoglavjih si bomo ogledali, kako podatke pripravimo v ustrezno obliko za gradnjo modelov, kako in kakšne modele zgradimo ter na kakšen način iščemo optimalne nastavitve hidroponičnega sistema z zgrajenimi modeli.

## 4.1 Opis oblike podatkov in nastavitvev hidroponičnega rastlinjaka

V tem podpoglavju si bomo najprej pogledali, katere podatke zbiramo ob vzgoji rastlin, kako pogosto jih beležimo in v kakšni obliki. Implementirani hidroponični sistem zbira več različnih podatkov ob različnih priložnostih.

### Parametri okolja

Podatke v zvezi z okoljem rastlin oziroma z okoljskimi pogoji v prostoru za

**Tabela 4.1:** Opis parametrov okolja, ki jih beležimo.

Ime	Opis	Frekvenca zajemanja	Običanje vrednosti
Temperatura zraka	Temperatura zraka v prostoru za vzgojo rastlin.	Nekajkrat na uro	Sobna temperatura
Vlažnost zraka	Relativna vlažnost zraka v odstotkih.	Nekajkrat na uro	Sobna vlažnost
Čas vklopa luči	Trajanje vklopljenih luči na dnevni ravni.	Ob vklopu/izklopu	8 – 18 ur

vzgojo rastlin hidroponični sistem zajema in beleži avtomatsko. Obliko podatkov in njihov opis smo predstavili v tabeli 4.1.

#### Parametri povezani z dovajanjem hranil rastlinam

Podatke v zvezi z dovajanjem hranil rastlinam hidroponični sistem zajema in beleži avtomatsko. Obliko podatkov in njihov opis smo predstavili v tabeli 4.2.

#### Parametri v zvezi z rastlinami

Podatke v zvezi z življenjskim ciklom posamezne rastline zbiramo polavtomatsko. Nekatere podatke moramo vnesti ročno. Ob dodajanju rastline v hidroponični sistem moramo to rastlino registrirati. Ob registraciji sistem zabeleži čas, ko smo rastlino presadili v hidroponični sistem, od nas pa zahteva tudi njeno starost od setve v kalilnik. Podobno je pri odstranjevanju rastline iz sistema. Njeno odstranitev moramo registrirati, ter navesti razlog odstranitve, v kolikor gre za abnormalno odstranitev, ko na primer rastlina začne razvijati bolezenske znake ali odmre. Obliko podatkov in njihov opis smo predstavili v tabeli 4.3.

**Tabela 4.2:** Opis parametrov v zvezi z dovajanjem hranil, ki jih beležimo.

Ime	Opis	Frekvenca zajemanja	Običanje vrednosti
EC	<i>Electrical conductivity</i> – električna prevodnost vode, ki je standardno merilo za koncentracijo mineralnih hranil raztopljenih v vodi.	Nekajkrat na uro	150 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ (voda iz pipe) – 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ (lahko že preslano za nekatere rastline)
pH	Kislost vode	Nekajkrat na uro	Uporabna lestvica je pH 5,5 do pH 6,5
Pogostost dovajanja hranil	Kako pogosto (oz. s kakšnim razmakom) se dovaja hranila v obliki pršenja med korenine	Ob vsakem pršenju.	1 – 30 min
Trajanje dovajanja hranil	Koliko časa traja posamezno pršenje hranil.	Ob vsakem pršenju	1 – 30 sekund

**Tabela 4.3:** Opis parametrov v zvezi z rastjo rastline.

Ime	Opis	Frekvenca zajemanja	Običanje vrednosti
Starost rastline od sejanja	Starost rastline od trenutka ko je bila posejana v kalilnik.	Ob presaditvi v sistem	Sadike so stare od 1 to 5 tednov ob presaditvi v sistem.
Starost rastline od presaditve v sistem	Starost rastline od trenutka, ko je bila sadika premeščena v hidroponični rastlinjak.	Ob presaditvi v rastlinjak.	Eksperimentom omejeno na 10 – 12 dni
Listna površina	Listna površina rastline izvečena iz fotografije rastline.	Približno enkrat na 24 ur	0 – 25 $\text{cm}^2$
Razlog odstranitve	Zakaj smo rastlino odstranili – konec poskusa ali propad rastline.	Ob odstranjevanju	Konec poskusa, rastlina se je posušila, rastlina je razvila znake bolezni.



## 4.2 Priprava podatkov za modeliranje

Parametre sistema, ki jih hidroponični sistem po večini avtomatsko zajema, obdelamo. Cilji obdelave podatkov so naslednji:

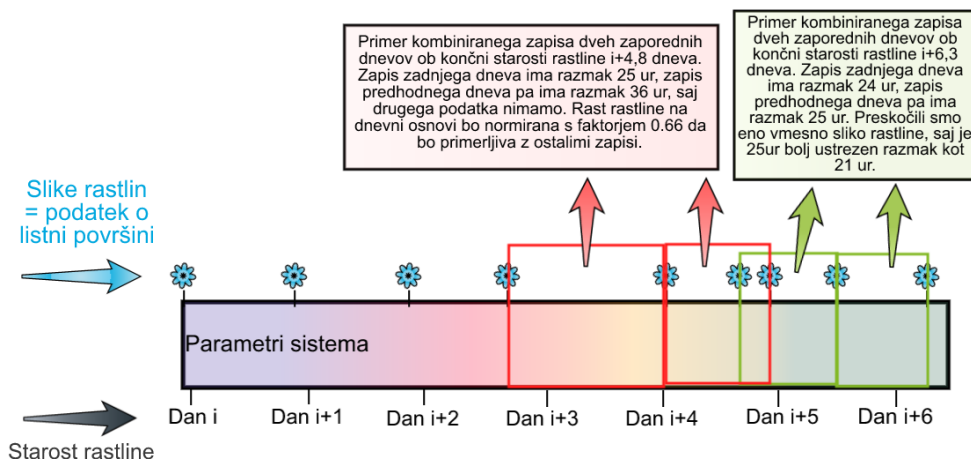
1. izoblikovanje smiselne oblike zapisa, ki bo združeval nastavitve hidroponičnega sistema in rast rastline v krajšem obdobju,
2. uskladitev različnih frekvenc zajemanja pri različnih podatkih,
3. izračun novih (odvisnih) podatkov.

### 4.2.1 Izoblikovanje oblike zapisa

Želimo izoblikovati zapis, ki bo združeval nastavitve hidroponičnega sistema in rast rastline. Rast rastline je podatek, ki ga lahko izračunamo kot razliko med dvema listnima površinama te rastline. Ker podatek o listni površini zajemamo s pomočjo fotografiranja rastlin, je frekvenca zajema 24 ur. Zato je smiselno, da zapis oblikujemo kot povprečje zapisov nastavitvev hidroponičnega sistema v obdobju med tema dvema zajetima listnima površinama. Takšen zapis ima torej podatke o začetni listni površini, končni listni površini in povprečne vrednosti nastavitvev hidroponičnega sistema v tem obdobju. Tak zapis lahko uporabimo na modularen način, saj lahko več zapisov združimo, da izoblikujemo zapis zgodovine rastline. Tako na primer združimo zapis med zadnjima dvema zajetima listnima površinama ( $i$  in  $i - 1$ ) ter zapis prejšnjih dveh listnih površin ( $i - 1$  in  $i - 2$ ). Tako dobimo zapis, ki predstavlja časovno vrsto rasti rastline s pripadajočimi nastavitvami hidroponičnega sistema.

### 4.2.2 Uskladitev frekvence zajemanja različnih podatkov

Avtomatsko zajeti podatki se zajemajo v različnih intervalih. Nekateri podatki se zajemajo zelo pogosto, večkrat na uro, medtem ko se drugi podatki



**Slika 4.1:** Predstavitev priprave podatkov za dva robna primera. V prvem primeru, označenem z zeleno barvo vidimo poseben primer, ko smo en podatek o listni površini izpustili, ker je bil na voljo podatek, ki se je bolje ujemal z izbranim časovnim okvirjem. V primeru označenem z rdečo pa vidimo drug poseben primer, kjer nismo imeli podatka v zelenem časovnem okviru, zato smo vzeli prejšnjega. Pri tem smo upoštevali nastavitve sistema v celotnem okvirju, saj so ti parametri vplivali na rast. Vrednosti pa smo normirali na obdobje 24 ur, da je tak zapis primerljiv z ostalimi.

zbirajo le približno enkrat dnevno. Dilema, s katero se spopademo pri preoblikovanju v željeno obliko zapisa, je kako določiti dnevne ločnice. Zaradi zunanjih dejavnikov namreč ne moremo zagotoviti, da imamo podatek o listni površini rastline na voljo točno v razmaku 24 ur.

Zapis za rast rastline zato oblikujemo kot zapis med zadnjima dvema zapisoma o listni površini. V tem obdobju povprečimo podatke, ki so bili zajemani zelo pogosto. V kolikor razmak med podatkom o listni površini ni natanko 24 ur, moramo nekatere seštevke oziroma povprečja normirati na razmak 24 ur. Tako dobimo vrednosti, ki so primerljive z zapisi narejenimi v razmaku 24 ur. Kako razrešujemo bolj težavne primere neskladanja časovnih okvirov podatkov (ki so sicer redki) je razvidno iz slike 4.1.

### 4.2.3 Izračun novih odvisnih podatkov

S sumacijo podatkov v en zapis poleg povprečenih parametrov iz prvega podpoglavja izoblikujemo naslednje dodatne podatke:

- listna površina rastline na začetku zapisa,
- listna površina rastline na koncu zapisa,
- procentualna rast rastline v obdobju zapisa normirana na obdobje 24 ur,
- povprečna temperatura v nočnem času (noč v tem kontekstu pomeni čas, ko ni vklopljena luč v hidroponičnem sistemu),
- povprečna temperatura v dnevnem času (dan v tem kontekstu pomeni čas, ko je vklopljena luč v hidroponičnem sistemu),
- povprečna razpršena voda v sistem (število sekund pršenja na uro).

### 4.2.4 Oblika zapisa

Z omenjenimi pristopi oblikujemo zapis, ki ga bomo uporabili pri modeliranju odziva rastlin na nastavitve hidroponičnega sistema. Glede na to, da je odziv rastlin na pogoje relativno počasen in deloma akumulativen je smiselno, da zapise oblikujemo tako, da obsegajo več dnevov zgodovine. Vendar pa tega ne moremo storiti v prvih dneh rasti rastline, saj takrat tako obsežne zgodovine še nimamo. Zato bomo predstavili dve obliki zapisa: osnovni zapis in dopolnilni zapis. Vsaka rastlina bo imela osnovni zapis, ki bo poleg zgodovine rasti in nastavitvev hidroponičnega sistema zadnjega dneva vseboval tudi nekaj ključnih podatkov o stanju rastline, kot na primer starost rastline od presaditve v hidroponični sistem in starost rastline od setve v kalilnik ter podatek o razvoju bolezenskih znakov ali propadu rastline. Dopolnilni zapis teh dodatnih podatkov ne bo imel, saj ga bomo uporabljali za pretekle dneve, razen zadnjega dneva. Vseboval bo le podatke o rasti rastline in nastavitvah hidroponičnega sistema. Podrobno sestavo zapisa smo predstavili v

tabeli 4.4. Dopolnilne zapise bomo lahko oblikovali tudi tako, da bo en zapis združeval širše povprečje, na primer v 48 urnem obdobju. Če povzamemo s kratkim primerom uporabe: za rastline stare 4 dni je smiselno uporabiti zapis, ki ga sestavljajo: osnovni zapis, v katerem je že vključena zgodovina zadnjega dneva (dan  $i$ ), dopolnilni zapis predhodnega dneva (dan  $i - 1$ ) in dopolnilni zapis, kjer združimo še dva dneva pred tem ( $i - 2$  in  $i - 3$  — to sta prva dva dneva rastline).

### 4.3 Izgradnja modelov

Spoznali smo, kako zajete podatke iz rastlinjaka obdelamo, da oblikujemo smiselne zapise. Iz zapisov lahko zgradimo modele, saj vsebujejo vhodne spremenljivke, katerih število je sicer odvisno od količine zgodovine rastline, ki jo vključimo v zapis. Vsebujejo pa tudi izhodni spremenljivki, ki nam povesta končno listno površino rastline in pojav bolezenskih znakov rastline, med katerega bomo šteli tudi propad rastline. Naš cilj je izdelati modele, na katerih bomo lahko napovedali odziv rastlin na določene nastavitve hidroponičnega sistema. Omenili smo, kako podatke zbiramo in obdelamo, podrobnosti o podatkih, ki smo jih zbrali za namen izgradnje modelov pa si bomo natančneje pogledali v poglavju 5.

Za izgradnjo modelov smo preizkusili več različnih pristopov strojnega učenja. Zaradi nelinearne odvisnosti med posameznimi nastavitvami hidroponičnega sistema in njihovim vplivom na rast rastline, ki smo jih omenjali že v poglavju 2, smo se odločili za uporabo modelov na osnovi enosmernih nevronskih mrež (*Feedforward Neural Network*). Enosmerne nevronske mreže sestavlja omrežje nevronov, ki predstavljajo odločitvene enote. Da zagotovimo enosmerno delovanje nevronske mreže razvrstimo v  $n$  nivojev. Minimalno število nivojev je 2, saj vedno potrebujemo vhodni in izhodni nivo. Vsak dodatni nivo, ki ga postavimo med vhodnega in izhodnega, pa imenujemo skriti nivo. Informacije ne glede na število nivojev vedno prehajajo v smeri od vhodov k izhodom. V modelu je izhod nevronske mreže definiran kot utežena vsota vhodov,

**Tabela 4.4:** Pregled podatkov, ki jih združuje zapis. Osnovni zapis vsebuje vse našete podatke. Dopolnilni zapis obsega le podatke označene z 'X' v stolpcu 'Dopolnilni zapis'. V stolpcu 'Vloga' smo označili vlogo podatka pri modeliranju. Vsak podatek nastopa v modelu bodisi kot vhod ali kot izhod.

Parameter	Dopolnilni zapis	Vloga	Opombe
Povprečna temperatura zraka	X	Vhod	
Povprečna temperatura zraka ponoči	X	Vhod	V času ugasnjene luči.
Povprečna temperatura zraka podnevi	X	Vhod	V času prižgane luči.
Procent vklopa luči na dnevni ravni	X	Vhod	Trajanje obdobja prižgane luči na dnevni ravni deljeno s 24 ur.
Povprečna slanost vode (EC)	X	Vhod	
Povprečna kislost vode (pH)	X	Vhod	
Povprečni razmak med dovajanjem hranil	X	Vhod	Kolikšen je v povprečju zamik med dvema dovajanjema hranil.
Povprečno trajanje dovajanja hranil	X	Vhod	Povprečno trajanje dovajanja hranil.
Povprečni volumen dovajanja hranil	X	Vhod	Skupni volumen pršenja izražen kot število sekund pršenja v eni uri.
Prvotna listna površina	X	Vhod	Listna površina na začetku zapisa.
Starost rastline od sejanja		Vhod	Starost rastline v času zapisa od trenutka setve v kalilnik.
Starost rastline od presaditve v sistem		Vhod	Starost rastline v času zapisa od presaditve v sistem.
Končna listna površina		Izhod	Listna površina na koncu zapisa.
Bolezniški znaki		Izhod	Ali smo to rastlino v obdobju tega zapisa odstranili iz sistema ker je kazala bolezenske znake ali je propadla.

dodatno transformirana z aktivacijsko funkcijo, ki opravlja vlogo praga aktivacije [33].

Za implementacijo izgradnje, učenja in ocenjevanja točnosti smo uporabili knjižnico Accord.NET, ki smo jo uporabili tudi že za procesiranje fotografij rastlin.

### 4.3.1 Kakšne modele potrebujemo

Za učinkovito napovedovanje odziva rastline na dane nastavitve hidropničnega sistema potrebujemo dva različna modela. Prvi model uporabimo za napoved listne površine posamezne rastline čez 24 ur. Drugi model pa uporabimo za napoved verjetnosti, da rastlina preživi in ne razvije nobenih bolezenskih znakov. Ta model potrebujemo iz vsaj dveh razlogov. V prvih dneh po presaditvi rastlin v hidroponični sistem so te (nekateri primerki bolj, drugi manj) občutljive na ekstremne nastavitve. Naš cilj je, da dosežemo največjo rast vseh rastlin, brez nepotrebnih izgub. Drugi razlog za potrebo po modelu za napoved verjetnosti preživetja brez bolezenskih znakov pa so neprimerne in/ali ekstremne nastavitve v kasnejših dneh, ko ob takih nastavitvah rastline sicer rastejo hitro vendar razvijejo bolezenske znake. Najpogostejše so listne ožganine (*angleško Leaf Scorch*) [34]. Oba modela v osnovi delujeta na enakih vhodnih podatkih, razlikujeta se le v arhitekturi in izhodnem podatku.

S starostjo rastline se, vsaj v začetnih dneh, spreminja tudi oblika podatkov in s tem oblika modela. Eksperimentalno smo določili, da je vključevanje čim večje količine zgodovine rastline zelo smiselno, vendar ne več kot za 5 preteklih dni. Ker pa za rastline stare manj kot 5 dni nimamo na voljo podatkov o vseh 5 preteklih dneh to pomeni, da bomo prisiljeni uporabiti ločene pare modelov vsaj za dneve 1, 2, 3 in 4. Glede na to, da so odzivi rastlin na določene pogoje ob različnih starostih drugačni, pa je smiselno uporabiti drug par modelov za vsak dan starosti rastline. Vsak par modelov zgradimo le na podatkih rastlin, ki so približno enake starosti kot trenutne rastline. Podrobnosti selekcije rastlin za posamezen par modelov smo predstavili v

tabeli 4.5, v stolpcu Starost rastlin v modelu.

### 4.3.2 Struktura in arhitektura nevronske mreže

Kot je razvidno iz tabele 4.4, ima osnovni zapis 12 vhodnih atributov, dopolnilni pa 10. Glede na število dopolnilnih zapisov  $d$ , ki smo jih uporabili imamo tako v nevronski mreži  $12 + 10 * d$  vhodnih nevronov, ter v vsakem primeru po en izhodni nevron. V nevronski mreži smo uporabili tudi en skriti nivo, za katerega smo eksperimentalno določili, da je smiselno uporabiti enako število nevronov, kot v vhodnem nivoju. Za rastline stare 5 dni, kjer smo eksperimentalno določili, da je smiselna oblika zapisa osnovni zapis ter trije dopolnilni zapisi to pomeni arhitekturo nevronske mreže  $42 : 42 : 1$ . Ostale variacije smo predstavili v tabeli 4.5.

### 4.3.3 Učenje nevronske mreže

Preden pričnemo s procesom učenja podatkov izvedemo vse opisane korake priprave podatkov glede na to, katere podatke potrebujemo. Če nevronske mreže učimo z namenom optimizacije rasti, potem pripravimo podatke in potrebne nevronske mreže glede na starosti trenutnih rastlin v rastlinjaku. Ob pripravi matrik vhodov in izhodov nevronske mreže, ki jih bomo uporabili za učenje, podatke še standardiziramo oziroma normaliziramo. Vsakega od vhodnih atributov ločeno standardiziramo tako, da mu odštejemo povprečno vrednost, ter njegov razpon razširimo s takim koeficientom, da je njegova standardna deviacija enaka 1. Izhodni atribut v vsaki od matrik pa le normaliziramo: odštejemo mu minimalno vrednost in njegov razpon normaliziramo med 0,1 in 0,9, da preprečimo zasičenje izhodnega nevrona. Vse normalizacijske funkcije in njihove obratne funkcije, ki normalizirano vrednost preslikajo nazaj v prvotno vrednost, shranimo za kasnejšo uporabo pri napovedovanju in računanju absolutnih napak.

Zaradi šuma v podatkih, ki se pojavi zaradi zelo raznolikega odziva rastlin na dane pogoje in o katerem bomo natančneje spregovorili v poglavju 5, upo-

**Tabela 4.5:** Oblika in struktura zapisov glede na starost rastline s pripadajočo arhitekturo modela nevronske mreže. Ne glede na starost je zapis vedno sestavljen iz osnovnega zapisa. V stolpcu 'Dopolnilni zapisi' pa smo predstavili, kateri dodatni dnevi zgodovine so bili dodani osnovnemu zapisu. Osnovni zapis vsebuje podatke za dan  $i$ , to je bodisi zadnji dan rasti rastline, bodisi dan, katerega rast napovedujemo. Tako  $(i - 1)$  predstavlja dan pred osnovnim zapisom ( $i$ ). S strukturo oblike  $(i - 3 : i - 5)$  pa smo ponazorili dopolnilni zapis, ki vsebuje povprečje večih dnevov zgodovine rastline. V stolpcu Starosti rastlin v modelu pa smo predstavili, katere rastline vključimo v gradnjo modela. Na primer, če je rastlina v hidroponičnem sistemu stara 4 dni, bomo njen napovedni model zgradili na zapisih rastlin, ki se končajo v starostih  $4 \pm 1,5$  dneva.

Starost rastline	Dopolnilni zapisi	Arhitektura nevronske mreže	Starosti rastlin v modelu
1 dan	/	12 : 12 : 1	$\pm 2,5$ dneva
2 dneva	$(i - 1)$	22 : 22 : 1	$\pm 2,5$ dneva
3 dnevi	$(i - 1), (i - 2)$	32 : 32 : 1	$\pm 2,5$ dneva
4 dnevi	$(i - 1), (i - 2), (i - 3)$	42 : 42 : 1	$\pm 1,5$ dneva
5 dni	$(i - 1), (i - 2), (i - 3 : i - 4)$	42 : 42 : 1	$\pm 1,5$ dneva
6 dni	$(i - 1), (i - 2), (i - 3 : i - 4)$	42 : 42 : 1	$\pm 1,5$ dneva
7 dni	$(i - 1), (i - 2), (i - 3 : i - 5)$	42 : 42 : 1	$\pm 1,5$ dneva
8 dni	$(i - 1), (i - 2), (i - 3 : i - 5)$	42 : 42 : 1	$\pm 1,5$ dneva
9 dni ali več	$(i - 1), (i - 2), (i - 3 : i - 5)$	42 : 42 : 1	$\pm 2$ dneva



rabljamo nekoliko nestandardno metodo učenja. Uporabljamo kombinacijo dveh poznanih algoritmov za učenje nevronske mreže: algoritma vzvratnega učenja (*angleško Backpropagation*) [35] in algoritma Levenberg-Marquardt [36]. Odlika Levenberg-Marquardt algoritma je, da se uči zelo hitro, kar pomeni da ga je zelo smiselno uporabiti v našem primeru, ko strojno učenje poganjamo na relativno nezmogljivi razvojni ploščici Raspberry Pi 3. Zato učenje pričnemo z algoritmom Levenberg-Marquardt, vendar le 7 iteracij. Po 7 iteracijah so uteži nevronske mreže nastavljene že približno pravilno, kar omogoči da gradientni spust, ki je osnova algoritma vzvratnega učenja, rešitev še nekoliko izboljša, brez da bi se model v preveliki meri prilagal podatkom. Z algoritmom vzvratnega učenja tako naredimo še 500 iteracij. Eksperimentalno smo s prečnim preverjanjem, katerega bomo obrazložili v naslednjem podpoglavju, ugotovili da je takšna omejitev iteracij zelo smiselna in zelo dober kompromis med naučenostjo nevronske mreže, porabljenim časom za izgradnjo in preprečevanjem prevelikega prilaganja učnim podatkom.

#### 4.3.4 Ocenjevanje točnosti modelov

Za računanje točnosti napovedi, ki smo jih dobili na izhodu nevronske mreže, smo uporabili pristop navzkrižne validacije (*Cross-Validation*) [37]. Podatke, ki smo jih imeli na voljo za izgradnjo modela, smo naključno razdelili na 8 delov. Izvedli smo 8 iteracij ocenjevanja točnosti modela, kjer smo iterativno izbrali enega od osmih delov podatkov in ga shranili za ocenjevanje napovedne točnosti modela. V vsaki iteraciji smo zgradili nov model in ga naučili na preostalih 7 delih podatkov. Napovedno točnost modela smo ovrednotili z metrikami korena povprečja kvadratov napak (*angleško Root Mean Squared Error, kratica RMSE*) [38] in relativne absolutne napake (*angleško Relative Absolute Error, kratica RAE*) [39].

V običajnem načinu delovanja programske opreme, preden zgradimo modele za potrebe optimizacije rasti, z enakimi podatki modele ovrednotimo z opisano metodo in rezultat shranimo v podatkovno bazo. Za vsako optimizacijo nastavitev hidroponičnega sistema tako hranimo kratko poročilo, ki poleg

točnosti napovednih modelov vsebuje tudi podatek o količini uporabljenih zapisov ter stare in nove nastavitve hidroponičnega sistema. V programsko opremo pa smo dodali tudi poseben testni način, ki nam zgradi modele za vse dneve oziroma starosti rastlin, za katere imamo podatke na voljo. Ta način uporabimo za eksperimentalno iskanje optimalnih parametrov modelov; kot so arhitektura nevronskih mrež, količina zgodovine rastlin pri posameznih starostih in posebni parametri algoritmov za učenje (hitrost učenja, učni moment, parametri aktivacijskih funkcij v nevronih). V tem načinu lahko tudi izračunamo povprečno napako napovedi ne glede na starost rastline, tako da izračunamo uteženo povprečje napak vseh modelov iste vrste. Uteži določimo glede na količino podatkov, ki jih imamo za posamezno starost rastline. Izhod testnega načina, ki nam oceni točnost modelov za vse posamične dneve ter skupno točnost modelov, smo predstavili v tabeli 4.6. Metoda, ki smo si jo izbrali za merjenje rasti rastline ima nekaj pomanjkljivosti, ki se odražajo tudi pri doseženih napovednih točnostih. Zbranim podatkom se bomo natančneje posvetili v poglavju 5. Podrobnosti težav pri ocenjevanju rasti rastline pa smo opisali v dodatku A.

## 4.4 Iskanje optimalnih parametrov

Z izdelanimi modeli, ki posnemajo odziv rastlin v hidroponičnem sistemu, lahko pričnemo postopek iskanja najbolj optimalnih nastavitvev hidroponičnega sistema. V te namene uporabljamo genetski algoritem, ki ga prav tako ponuja knjižnica Accord.NET. Genetski algoritem je algoritem, ki posnema delovanje evolucije, ki jo poznamo iz narave. Uporablja 3 osnovne korake pri iskanju optimalne rešitve: križanje, mutiranje in selekcijo. Pri uporabi genetskega algoritma potencialne rešitve zapišemo ali pa naključno generiramo v obliki kromosomov. Vsak kromosom drži podatke o rešitvi. Za vsak kromosom moramo biti zmožni računsko oceniti njegovo uspešnost (*angleško fitness*). V vsakem koraku genetskega algoritma držimo tako imenovano populacijo, to je množico kromosomov. Nekatere od kromosomov izberemo za

**Tabela 4.6:** Pregled točnosti modelov po posameznih dnevih in skupno. Napako obeh vrst modelov smo ovrednotili z metrikami korena povprečja kvadratov napak (*RMSE*) in relativne absolutne napake (*RAE*). Napaka modelov med posameznimi zagoni programa za ocenjevanje točnosti niha za  $\pm 1$  %, kolikor ocenjujemo točnost podajanja napake.

Dan	RMSE razvoja bolezenskih znakov	RAE razvoja bo- lezenskih znakov	RMSE listne površine	RAE listne površine
1	0,21	0,26	0,68	0,51
2	0,21	0,25	0,72	0,48
3	0,16	0,21	0,73	0,46
4	0,13	0,17	0,73	0,45
5	0,11	0,13	0,82	0,42
6	0,12	0,14	0,83	0,38
7	0,12	0,15	0,87	0,32
8	0,12	0,15	0,88	0,27
9	0,10	0,13	0,9	0,22
10	0,08	0,10	1,02	0,20
<b>Skupno</b>	0,14	0,17	0,80	0,36

križanje in jih v parih križamo tako, da vzamemo nekaj lastnosti ter jih zamenjamo med kromosomoma. Oba križanca dodamo v populacijo. Podobno nekaj kromosomov izberemo za naključno mutacijo lastnosti, pri čemer tudi mutirane kromosome dodamo v populacijo. V teh dveh korakih populacija nekoliko zraste, zato izvedemo postopek selekcije, kjer vsakemu kromosomu ocenimo uspešnost in najmanj uspešne odstranimo. S tem dosežemo prvotno velikost populacije. Postopek ponavljamo do zahtevanega ustavitvenega pogoja [40].

V našem primeru smo elemente genetskega algoritma definirali na spodaj opisan način.

- **Kromosom** smo definirali kot seznam nastavitvev hidroponičnega sistema. Za hitrejše preiskovanje smo v kromosomu vsako nastavitvev hidroponičnega sistema predstavili s celoštevilsko vrednostjo med 0 in 63. V kromosom smo integrirali tudi funkcionalnost, da omenjeni celoštevilski razpon preslikamo v dejanske vrednosti nastavitvev. Preslikavo smo smiselno omejili in s tem preprečili, da bi sistem poiskal neveljavne nastavitve. Vse nastavitve hidroponičnega sistema, ki so zapisane v kromosomu, in njihov razpon smo predstavili v tabeli 4.7.
- **Uspešnost** smo implementirali kot vrednotenje nastavitvev, spravljenih v kromosomu, nad trenutnim stanjem rastlin. Najprej pripravimo zapise trenutnih rastlin, pri čemer njihovo zgodovino zamaknemo za en dan, v zgodovino zadnjega dne pa vnesemo nastavitve hidroponičnega sistema iz kromosoma. Uporabimo pripravljene modele, ki ustrezajo starosti rastline čez 24 ur in napovemo verjetnost, da rastlina preživi in ne razvije bolezenskih znakov ter njeno listno površino čez 24 ur. Postopek ponovimo za vse rastline, ki so trenutno v hidroponičnem sistemu. Končna vrednost uspešnosti je seštevek vseh zmnožkov verjetnosti preživetja in listne površine čez 24 ur. Tako ocenimo listno površino rastline, ki bo preživela, čez 24 ur.
- **Populacija** je velikosti 40 kromosomov. V začetno populacijo vsta-

vimo kromosom, ki vsebuje trenutne nastavitve hidroponičnega sistema. Ostalih 39 kromosomov pa generiramo naključno.

- **Križanje** smo implementirali kot zamenjavo ene naključno izbrane nastavitve hidroponičnega sistema, ki se nahaja v kromosomih. Verjetnost za križanje posameznega kromosoma smo nastavili na 0,75.
- **Mutacija** smo implementirali kot povečanje ali zmanjšanje ene naključno izbrane nastavitve hidroponičnega sistema. Verjetnost, da posamezen kromosom v populaciji doleti mutacija smo nastavili na 0,25.
- **Selekcijo** smo implementirali tako, da vedno obdrži zgornjih 10 % najboljših kromosomov. Ostale primerke pa izberemo z algoritmom imenovanim selekcija kolesa rolete (*angleško Roulette wheel selection*) [41]. Verjetnost, da v naslednji krog izberemo enega od preostalih kromosomov, je sorazmerna z uspešnostjo kromosoma. Lahko si predstavljamo kolo rolete, na katerega nanizamo kromosome - vsako polje rolete je en kromosom. Vendar polja postavimo tako, da so nekatera večja, druga manjša, sorazmerno z uspešnostjo kromosoma. Kromosome izbiramo z metom žogice po roletu dokler ne nabereemo dovolj kromosomov za zapolnitev prvotne velikosti populacije.

Ustavitveni pogoj genetskega algoritma je v našem primeru število iteracij. Eksperimentalno smo ugotovili, da se uspešnost najuspešnejšega kromosoma neha povečevati po nekaj 100 iteracijah. Zato smo algoritem omejili na 500 iteracij. Po 500 iteracijah nastavitve iz najboljšega kromosoma uveljavimo v hidroponičnem sistemu.

**Tabela 4.7:** Nastavitve hidroponičnega sistema, kot so zapisane v kromosomu. Vsaka nastavitev hidroponičnega sistema je v kromosomu zapisana celoštevilsko z vrednostjo med 0 in 63. Glede na vrsto nastavitve celoštevilsko vrednost linearno preslikamo v intervale navedene v tabeli.

Nastavitev hidroponičnega sistema	Preslikan razpon
Delež dneva (vklopljenih luči)	0,2 - 0,9
Temperatura	19 °C - 30 °C
Kislost vode s hranili (pH)	5,0 - 7,0
Koncentracija hranil v vodi s hranili (EC)	300 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ - 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$
Razmak med dovajanjem hranil za prvo posodo za vzgojo rastlin	30 s - 1800 s
Trajanje dovajanja hranil za prvo posodo za vzgojo rastlin	1 s - 15 s
Razmak med dovajanjem hranil za drugo posodo za vzgojo rastlin	30 s - 1800 s
Trajanje dovajanja hranil za drugo posodo za vzgojo rastlin	1 s - 15 s
Razmak med dovajanjem hranil za tretjo posodo za vzgojo rastlin	30 s - 1800 s
Trajanje dovajanja hranil za tretjo posodo za vzgojo rastlin	1 s - 15 s

## Poglavje 5

# Prilagajanje sistema z eksperimenti

V okviru magistrske naloge smo izvajali eksperimente – vzgojo rastlin pod budnim očesom kamere – pri čemer smo beležili vse okoljske in hranilne pogoje, ki so vplivali na rast rastline. Ta del naloge je bil bistvenega pomena, saj nam je zagotovil potrebne podatke za izgradnjo modelov pri doseganju cilja optimizacije rasti. Prvi del eksperimentov, katerega namen je bil zbiranje podatkov, bomo poimenovali izvajanje eksperimentov z ekspertnimi nastavitvami. Zbiranje podatkov bomo, poleg uporabe za optimizacijo rasti, uporabili tudi za vrednotenje uspešnosti vzgoje rastlin z ekspertnimi nastavitvami. V drugem delu eksperimentov smo eksperimente izvajali z zaprtozančno regulacijo sistema. Povedano z drugimi besedami, smo vlogo eksperta prepustili računalniku, ki je nastavitve v hidroponičnem sistemu, glede na odzive rastlin, na dnevni ravni, samodejno prilagajal. Temu delu eksperimentov bomo rekli izvajanje zaprtozančnih eksperimentov.

Časovna omejenost magistrske naloge nam je predstavljala veliko omejitev pri izvajanju eksperimentov. Zato smo se bili prisiljeni omejiti le na eno vrsto rastline: izbrali smo priljubljeno vrsto solate zimsko ledenko. Eksperimente v hidroponičnem sistemu pa smo omejili zgolj na prvih 10 dni. Po 10 dnevih smo rastline iz hidroponičnega sistema zavrgli in posadili nove. Starost same

rastline je bila na koncu vsakega eksperimenta sicer več kot 10 dni, saj smo sadike rastlin iz semen na zalogo pripravljali v kalilniku. Za kalilnik smo uporabili plastično posodo z nekaj perlita, in zagotovili kislost 6,0 pH ter majhno količino hranil. Rastline so bile ob presaditvi v hidroponični sistem tako stare od 9 do 27 dni, v povprečju pa 16 dni.

V času nastajanja magistrske naloge smo tako uspeli izvesti 13 iteracij eksperimentov in presaditi v sistem kar 597 sadik.

## 5.1 Eksperimenti z ekspertnimi nastavitvami

V okviru izvajanja eksperimentov z ekspertnimi nastavitvami smo izvedli 8 eksperimentov in v sistem presadili 371 sadik. V nekaj iteracijah smo hidroponični sistem dovolj spoznali, da smo dosegli zadovoljive rezultate. Uspeh po posameznih eksperimentih smo predstavili v tabeli 5.1. Pri podajanju končne skupne listne površine v celotnem eksperimentu upoštevamo tudi listno površino rastlin, ki so med eksperimentom propadle (upoštevamo njihovo zadnjo zabeležno listno površino).

Uspešnost eksperimenta lahko vrednotimo glede na skupno pridelano listno površino v 10 dnevih. Eksperiment, kjer smo dosegli največjo absolutno skupno listno površino 310,8 cm<sup>2</sup> smo predstavili v tabeli 5.3. Težava tovrstnega vrednotenja je, da so sadike ob presaditvi v hidroponični sistem različnih starosti in velikosti. Kot je razvidno iz tabele 5.1 predstavlja začetna listna površina sadik znaten delež končne listne površine. S tem ozirom bi bilo smiselno vrednotiti uspešnost eksperimenta z odstotkom povečanja skupne listne površine v trajanju eksperimenta. Najboljši eksperiment po tovrstni metriki smo prikazali v tabeli 5.4, doseženo povečanje listne površine je bilo 368 %. Težava te metrike pa je v tem, da večje sadike ne nudijo nujno prednosti pri doseganju velike listne površine hitreje, saj se listna površina v hidroponičnem sistemu pridobiva veliko hitreje. Menimo, da je smiselno upoštevati obe metrike. V tabeli 5.2 smo dodatno predstavili še največje vzgojen primerek. Da bi olajšali delo strojnemu učenju, smo v preostalih



**Tabela 5.1:** Pregled eksperimentov z ekspertnimi nastavitvami. V stolpcu Starost sadik v dnevih smo zapisali starost sadik ob dnevu presaditve v hidroponični rastlinjak. Začetno listno površino navajamo kot seštevek listnih površin vseh rastlin. Končno listno površino navajamo kot seštevek listnih površin vseh rastlin pred propadom oziroma na zadnji dan eksperimenta. V stolpcu 'Rast' smo prikazali odstotek povečanja skupne listne površine skozi dobo eksperimenta.

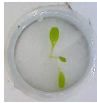










Datum pričetka	Starost sadik v dnevih	Začetna listna površina	Končna listna površina	Rast	Opombe
11.8.2016	27	56 cm <sup>2</sup>	51 cm <sup>2</sup>	-8 %	Eksperiment prekinjen po 4 dneh zaradi okvare.
16. 8. 2016	19	41 cm <sup>2</sup>	76 cm <sup>2</sup>	+85 %	
26. 8. 2016	9	63 cm <sup>2</sup>	91 cm <sup>2</sup>	+43 %	
7. 9. 2016	12	97 cm <sup>2</sup>	222 cm <sup>2</sup>	+129 %	
18. 9. 2016	11	72 cm <sup>2</sup>	303 cm <sup>2</sup>	+322 %	
1. 11. 2016	12	109 cm <sup>2</sup>	175 cm <sup>2</sup>	+61 %	
14. 11. 2016	25	135 cm <sup>2</sup>	320 cm <sup>2</sup>	+138 %	
27. 11. 2016	18	46 cm <sup>2</sup>	81 cm <sup>2</sup>	+76 %	

eksperimentih težili k temu, da prostor nastavitvev hidroponičnega sistema čim bolj raziščemo.

## 5.2 Podatki zbrani z eksperimenti

Hidroponični sistem je bil zasnovan tako, da na dnevni ravni napravi fotografije vsake posamične rastline. To pomeni, da smo od vsake rastline, ki je uspešno uspevala v sistemu vseh 10 dni zbrali 11 fotografij in iz teh podatkov lahko ustvarimo 10 zapisov za 10 različnih starosti rastline. Skupno smo v obdobju izvajanja eksperimentov z ekspertnimi nastavitvami zbrali 2215 zapisov. Če dodamo še zapise iz zaprtozančnih eksperimentov pa smo jih vse

**Tabela 5.2:** Rastlina z največjo končno listno površino iz obdobja ekspertnih eksperimentov. Ob presaditvi v hidroponični sistem, na dan 18. septembra 2016, je bila sadika stara 11 dni.

Dan	Listna površina	Nastavitve	Slika
0	2,8 cm <sup>2</sup>	EC: 600 $\mu$ S/cm <sup>2</sup> ; pH: 6,0; razmaki dovanja hranil: 600 s/600 s/300 s, trajanja 4 s/6 s/8 s; trajanje vklopa luči: 14 ur; temperatura: 24 °C	
1	3,5 cm <sup>2</sup>	nespremenjene	
2	3,3 cm <sup>2</sup>	nespremenjene	
3	4,1 cm <sup>2</sup>	nespremenjene	
4	5,5 cm <sup>2</sup>	nespremenjene	
5	7,3 cm <sup>2</sup>	nespremenjene	
6	8,9 cm <sup>2</sup>	nespremenjene	
7	10,6 cm <sup>2</sup>	nespremenjene	
8	14,5 cm <sup>2</sup>	nespremenjene	
9	18,9 cm <sup>2</sup>	nespremenjene	
10	25,7 cm <sup>2</sup>	nespremenjene	

**Tabela 5.3:** Eksperiment z največjo skupno listno površino vseh rastlin ob koncu. Sadike so bile na dan presaditve v hidroponični sistem 14. novembra 2016 stare 25 dni.

Dan	Skupna listna površina (živih)	Povprečna listna površina na rastlino	Nastavitve	Nastavitve dovajanja hranil za vse tri posode
0	/	/	EC: 950 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 15 ur temperatura: 23 °C	pršenje: 6 s, interval: 300 s pršenje: 8 s, interval: 250 s pršenje: 4 s, interval: 100 s
1	135 $\text{cm}^2$	3,4 $\text{cm}^2$	EC: 950 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 Vklop luči: 15 ur temperatura: 23 °C	pršenje: 6 s, interval: 300 s pršenje: 8 s, interval: 250 s pršenje: 4 s, interval: 100 s
2	134 $\text{cm}^2$	3,5 $\text{cm}^2$	EC: 950 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 15 ur temperatura: 23 °C	pršenje: 6 s, interval: 300 s pršenje: 8 s, interval: 250 s pršenje: 4 s, interval: 100 s
3	128 $\text{cm}^2$	3,6 $\text{cm}^2$	EC: 950 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 15 ur temperatura: 23 °C	pršenje: 6 s, interval: 300 s pršenje: 8 s, interval: 250 s pršenje: 4 s, interval: 100 s
4	124 $\text{cm}^2$	3,9 $\text{cm}^2$	EC: 950 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 15 ur temperatura: 23 °C	pršenje: 6 s, interval: 300 s pršenje: 8 s, interval: 250 s pršenje: 4 s, interval: 100 s
5	140 $\text{cm}^2$	4,4 $\text{cm}^2$	EC: 950 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 15 ur temperatura: 23 °C	pršenje: 6 s, interval: 300 s pršenje: 8 s, interval: 250 s pršenje: 4 s, interval: 100 s
6	143 $\text{cm}^2$	4,9 $\text{cm}^2$	EC: 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 15 ur temperatura: 23 °C	pršenje: 7 s, interval: 280 s pršenje: 8 s, interval: 250 s pršenje: 9 s, interval: 350 s
7	161 $\text{cm}^2$	5,6 $\text{cm}^2$	EC: 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 15 ur temperatura: 23 °C	pršenje: 7 s, interval: 280 s pršenje: 8 s, interval: 250 s pršenje: 9 s, interval: 350 s
8	197 $\text{cm}^2$	6,8 $\text{cm}^2$	EC: 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 15 ur temperatura: 23 °C	pršenje: 7 s, interval: 280 s pršenje: 8 s, interval: 250 s pršenje: 9 s, interval: 350 s
9	239 $\text{cm}^2$	8,2 $\text{cm}^2$	EC: 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 15 ur temperatura: 23 °C	pršenje: 7 s, interval: 280 s pršenje: 8 s, interval: 250 s pršenje: 9 s, interval: 350 s
10	290 $\text{cm}^2$	10 $\text{cm}^2$	EC: 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 15 ur temperatura: 23 °C	pršenje: 7 s, interval: 280 s pršenje: 8 s, interval: 250 s pršenje: 9 s, interval: 350 s

**Tabela 5.4:** Eksperiment z največjim odstotkom povečanja skupne listne površine. Sadike so bile na dan presaditve v hidroponični sistem 18. septembra 2016 stare 11 dni.

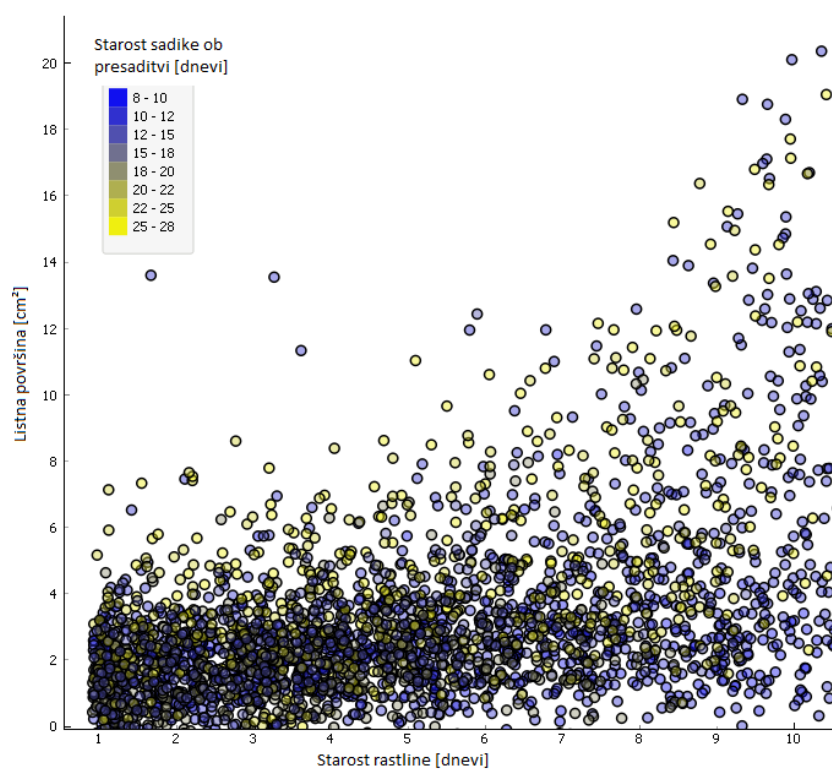
Dan	Skupna listna površina (živih)	Povprečna listna površina na rastlino	Nastavitve	Nastavitve dovajanja hranil za vse tri posode
0	72 cm <sup>2</sup>	1,8 cm <sup>2</sup>	EC: 600 $\mu$ S/cm <sup>2</sup> , pH: 6,0 vklop luči: 14 ur temperatura: 24 °C	pršenje: 8 s, interval: 300 s pršenje: 6 s, interval: 600 s pršenje: 6 s, interval: 600 s
1	68 cm <sup>2</sup>	1,8 cm <sup>2</sup>	EC: 600 $\mu$ S/cm <sup>2</sup> , pH: 6,0 vklop luči: 14 ur temperatura: 24 °C	pršenje: 8 s, interval: 300 s pršenje: 6 s, interval: 600 s pršenje: 6 s, interval: 600 s
2	76 cm <sup>2</sup>	1,9 cm <sup>2</sup>	EC: 600 $\mu$ S/cm <sup>2</sup> , pH: 6,0 vklop luči: 14 ur temperatura: 24 °C	pršenje: 8 s, interval: 300 s pršenje: 6 s, interval: 600 s pršenje: 6 s, interval: 600 s
3	67 cm <sup>2</sup>	2,3 cm <sup>2</sup>	EC: 600 $\mu$ S/cm <sup>2</sup> , pH: 6,0 vklop luči: 14 ur temperatura: 24 °C	pršenje: 8 s, interval: 300 s pršenje: 6 s, interval: 600 s pršenje: 6 s, interval: 600 s
4	70 cm <sup>2</sup>	2,5 cm <sup>2</sup>	EC: 600 $\mu$ S/cm <sup>2</sup> , pH: 6,0 vklop luči: 14 ur temperatura: 24 °C	pršenje: 8 s, interval: 300 s pršenje: 6 s, interval: 600 s pršenje: 6 s, interval: 600 s
5	89 cm <sup>2</sup>	3,2 cm <sup>2</sup>	EC: 600 $\mu$ S/cm <sup>2</sup> , pH: 6,0 vklop luči: 14 ur temperatura: 24 °C	pršenje: 8 s, interval: 300 s pršenje: 6 s, interval: 600 s pršenje: 6 s, interval: 600 s
6	107 cm <sup>2</sup>	4,0 cm <sup>2</sup>	EC: 600 $\mu$ S/cm <sup>2</sup> , pH: 6,0 vklop luči: 14 ur temperatura: 24 °C	pršenje: 8 s, interval: 300 s pršenje: 6 s, interval: 600 s pršenje: 6 s, interval: 600 s
7	117 cm <sup>2</sup>	4,9 cm <sup>2</sup>	EC: 600 $\mu$ S/cm <sup>2</sup> , pH: 6,0 vklop luči: 14 ur temperatura: 24 °C	pršenje: 8 s, interval: 300 s pršenje: 6 s, interval: 600 s pršenje: 6 s, interval: 600 s
8	165 cm <sup>2</sup>	6,4 cm <sup>2</sup>	EC: 600 $\mu$ S/cm <sup>2</sup> , pH: 6,0 vklop luči: 14 ur temperatura: 24 °C	pršenje: 8 s, interval: 300 s pršenje: 6 s, interval: 600 s pršenje: 6 s, interval: 600 s
9	213 cm <sup>2</sup>	8,2 cm <sup>2</sup>	EC: 600 $\mu$ S/cm <sup>2</sup> , pH: 6,0 vklop luči: 14 ur temperatura: 24 °C	pršenje: 8 s, interval: 300 s pršenje: 6 s, interval: 600 s pršenje: 6 s, interval: 600 s
10	280 cm <sup>2</sup>	10,8 cm <sup>2</sup>	EC: 600 $\mu$ S/cm <sup>2</sup> , pH: 6,0 vklop luči: 14 ur temperatura: 24 °C	pršenje: 8 s, interval: 300 s pršenje: 6 s, interval: 600 s pršenje: 6 s, interval: 600 s

skupaj zbrali 3896.

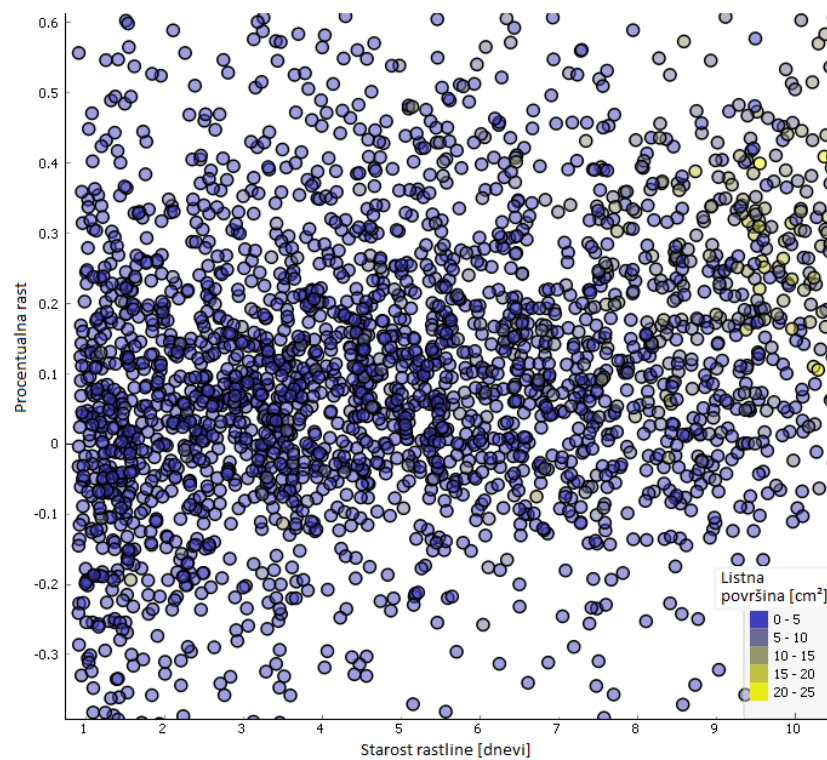
Na grafikonih na slikah 5.1 in 5.2 smo predstavili rast rastlin v odvisnosti od starosti rastline. Opazimo, da rastline rastejo z zelo različnimi hitrostmi. Razlogi za to so: različne nastavitve sistema, različna začetna starost sadik, različne genetske predispozicije posameznih rastlin. Posebno na grafikonu na sliki 5.2 opazimo, da je, zlasti v prvih nekaj dnevih, rast večkrat tudi negativna. V nekaterih primerih gre za upravičeno negativno rast, ki jo prinese propad rastline ali pomanjkanje vode ob neprimernih nastavitvah. V drugih primerih pa gre za težavo z izbrano metodo spremljanja rasti rastline. Rastline med svojo rastjo namreč spreminjajo obliko, kar vključuje tudi spremembo kotov pod katerimi listi izhajajo iz stebela ter rotacijo oziroma vihanje listov po vzdolžni osi. Našteta obnašanja rastline se lahko odražajo kot neupravičeno zaznana negativna rast. Teh rastlin ne moremo avtomatsko izločiti iz podatkov, saj bi s tem izločili tudi rastline, pri katerih smo upravičeno zaznali negativno rast. Te zapise potrebujemo zlasti za ovrednotenje zelo slabih nastavitvev hidroponičnega sistema. Prinašajo pa nam nekoliko šuma v podatke in zmanjšujejo napovedno točnost. V kasnejših fazah rasti se težava zaradi zelo hitre rasti rastline omili. Podrobneje smo težave v povezavi z zaznavanjem listne površine opisali v dodatku A. Na podlagi navedenih omejitev izbrane metode merjenja listne površine, ocenjujemo, da se relativna napaka giblje med 0 % in 80 %, vendar v povprečju približno okrog 15 %.

### 5.3 Zaprtozančni eksperimenti

Zaprtozančne eksperimente smo izvajali tako, da smo vgrajenemu sistemu prepustili kontrolo nad vsemi nastavitvami hidroponičnega sistema, razen nad kislostjo vode s hranili, ki smo jo nastavili na vrednost 6,0 pH. S tem smo nekoliko zmanjšali preiskovalni prostor hidroponičnih nastavitvev. Nastavitve temperature smo nekoliko omejevali glede na trenutno temperaturo v prostoru. Z zbranimi podatki smo namreč izračunali, da je v času vklopljenih luči hidroponični sistem zmožen regulirati temperaturo, ki je do največ



**Slika 5.1:** Na grafikonu je predstavljena listna površina rastline v odvisnosti od časa v dnevih. Barva krožcev nam pove starost sadike ob presaditvi v sistem, bolj rumena pomeni starejšo sadiko, bolj modra pa mlajšo.



**Slika 5.2:** Na grafikonu smo izrisali graf procentualne rasti rastline v odvisnosti od njene starosti v dnevih. Barva krožca pomeni listno površino rastline, bolj rumena pomeni večjo listno površino.

7 °C nad temperaturo prostora, v času izklopljenih luči pa do največ 2 °C nad temperaturo prostora.

V prvi iteraciji izvajanja zaprtozančnih eksperimentov smo ugotovili, da prostora nastavitev hidroponičnega sistema nismo povsem temeljito preiskali. Zaprtozančna regulacija je namreč predlagala zelo ekstremne nastavitve. Prva iteracija ni bila zelo uspešna. Dodaten pokazatelj je bil tudi velik razkorak med napovedano listno površino čez 24 ur in dejansko doseženo listno površino čez 24 ur, ki je bila v povprečju napovedana s kar 131 % napako. Že v drugem eksperimentu pa se je sistem pričel učiti na svojih napakah. V peti iteraciji je bil razkorak med napovedano listno površino čez 24 ur in dejansko doseženo listno površino le še povprečno 29 %. Razlike med napovedano in doseženo listno površino v zaprtozančnih eksperimentih smo predstavili na grafikonu na sliki 5.3. Opazimo, da je napoved skupne listne površine večino časa optimistično prevelika. Poleg same napake modelov je dodaten razlog za to napako zamik pri uveljavitvi novih nastavitvev hidroponičnega sistema. Zatem, ko posnamemo fotografije rastlin, mora vgrajen sistem slike še obdelati, zgraditi modele in poiskati optimalne nastavitve. Ta proces vzame od 60 do 120 minut. Hidroponični sistem za spremembo nekaterih parametrov, predvsem tistih v povezavi z vodo s hranili, tudi potrebuje nekaj časa, da jih prilagodi, oziroma je sprememba postopna. V ekstremnem primeru, kjer koncentracijo hranil v vodi s hranili spremenimo iz  $300 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  na  $2000 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  (mejni vrednosti), potrebuje hidroponični sistem približno 8 ur, da doseže željeni nivo. Proces je počasen, saj lahko dodajamo hranila le v vodo v rezervoarju, precejšen delež vode pa se nahaja tudi v obtoku. Na enak način, kot pri eksperimentih z ekspertnimi nastavitvami, smo uspešnost posameznih eksperimentov predstavili v tabeli 5.5. V četrtem eksperimentu smo dosegli največjo skupno listno površino ob koncu eksperimenta  $363 \text{ cm}^2$ , kar je za 13 % več kot v najboljši iteraciji eksperimentov z ekspertnimi nastavitvami. V istem eksperimentu smo, glede na metriko odstotka zvečanja skupne listne površine dosegli rezultat zvečanja za 643 %. Najboljši eksperiment voden z ekspertnimi nastavitvami je dosegel 322 % zvečanje skupne



listne površine. Iteracijo smo predstavili v tabeli 5.6.

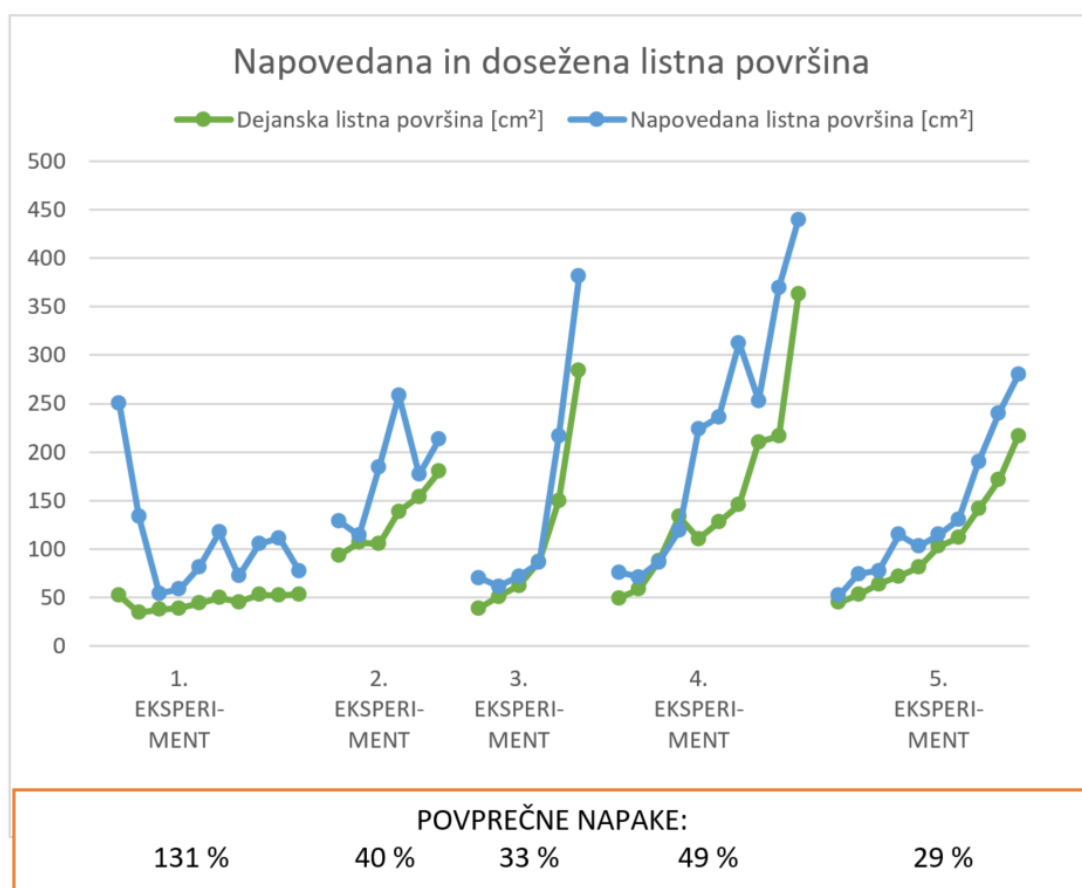
Primerjava uspešnosti zaprtozančnih eksperimentov z eksperimenti z ekspertnimi nastavitvami ni tako trivialna, saj imamo nekaj zunanjih dejavnikov, na katere nimamo pravega vpliva, kot na primer zunanja temperatura ter starost sadik, ko smo jih presadili v hidroponični sistem. Če primerjamo rezultate v tabelah 5.4 in 5.6, vidimo, da je v prvih treh dneh zaprtozančni eksperiment bolje prilagodil nastavitve, saj je manj rastlin propadlo. Kljub večji začetni listni površini v eksperimentu z ekspertnimi nastavitvami je bila skupna listna površina v tretjem dnevu že večja v zaprtozančnem eksperimentu. Na peti dan so bile velikosti rastlin v obeh eksperimentih zelo izenačene, saj je na četrti dan zaprtozančni sistem imel zelo dobre nastavitve, na peti pa zelo slabe. Od dneva 5 do dneva 8, so bili pogoji v obeh sistemih zelo podobni, saj so rastline rastle podobno hitro. V preostalih dnevih pa so bili pogoji boljši v eksperimentu z ekspertnimi nastavitvami, kar je na koncu privedlo tudi do večje povprečne listne površine na rastlino. Povečanje listne površine skozi celoten eksperiment je bilo boljše v zaprtozančnem eksperimentu, saj je imel slabše izhodišče (manjšo začetno skupno listno površino) ter je uspel preprečiti propad večjemu številu rastlin.

Če poizkusimo ovrednotiti nastavitve najuspešnejših eksperimentov z vidika ekspertnega znanja, ugotovimo, da so nekatere nastavitve logične in smiselne, nekatere pa ne. Logična je izbira mejne vrednosti koncentracije hranil  $2000 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  in mejnega trajanja vklopa luči 21 ur 35 min, saj sta koncentracija hranil in količina svetlobe glavna vira energije in hranil za rast. V ekspertnih eksperimentih nismo nikoli izbrali tako dolgega vklopa luči, saj tip rastline, ki smo jo izbrali, solata zimska ledenka, spada med tako imenovane *temne rastline*, ki imajo korist od obdobja brez svetlobe, idealno vsaj 8 ur. V ekspertnih eksperimentih tudi nismo posegali po tako visokih vrednostih koncentracij hranil. Nižjo koncentracijo hranil je možno kompenzirati z daljšo dolžino razprševanja hranil. Iz tega vidika je model dobro predvidel, da višji koncentraciji hranil ustreza krajši čas razprševanja hranil. Najmanj smiselne nastavitve zaprtozančne regulacije pa so veliki skoki koncentracije hranil in

**Tabela 5.5:** Pregled zaprtozančnih eksperimentov. V stolpcu Starost sadik v dnevih smo zapisali starost sadik ob dnevu presaditve v hidroponični rastlinjak. Začetno listno površino navajamo kot seštevek listnih površin vseh rastlin. Končno listno površino navajamo kot seštevek listnih površin vseh rastlin pred propadom oziroma na zadnji dan eksperimenta. V stolpcu 'Rast' smo prikazali odstotek povečanja skupne listne površine skozi dobo eksperimenta.

Datum pričetka	Starost sadik v dnevih	Začetna listna površina	Končna listna površina	Rast
11. 12. 2016	15	78 cm <sup>2</sup>	82 cm <sup>2</sup>	+5 %
21. 12. 2016	25	124 cm <sup>2</sup>	224 cm <sup>2</sup>	+80 %
30. 12. 2016	14	59 cm <sup>2</sup>	300 cm <sup>2</sup>	+407 %
10. 1. 2017	12	49 cm <sup>2</sup>	363 cm <sup>2</sup>	+643 %
21. 1. 2017	11	35 cm <sup>2</sup>	217 cm <sup>2</sup>	+526 %

trajanja vklopa luči iz najvišje ekstremne vrednosti v najnižjo. Najnižji nivo hranil in najkrajše trajanje vklopa luči na sredini eksperimenta nista smiselna, prav tako pa velike spremembe rastnih pogojev slabo vplivajo na rast rastline, saj povzročajo stres. Izbira takih nastavitev kaže na slabo naučen model ali pomanjkanje podatkov oziroma pomanjkanje raznolikosti podatkov za določene dneve.



**Slika 5.3:** Primerjava napovedi skupne listne površine čez 24 ur in dosežene skupne listne površine čez 24 ur. Na dnu grafikona so dodane še izračunane povprečne relativne napake za vsakega od eksperimentov.

**Tabela 5.6:** Zaprtozančni eksperiment z največjim odstotkom povečanja skupne listne površine in ob enem tudi absolutno največje končne skupne listne površine. Sadike so bile na dan presaditve v hidroponični sistem 10. januarja 2017 stare 12 dni.

Dan	Skupna listna površina (živih)	Povprečna listna površina na rastlino	Nastavitve	Nastavitve dovajanja hranil za vse tri posode
0	49 cm <sup>2</sup>	1,1 cm <sup>2</sup>	EC: 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 8 ur 15 min temperatura: 21 °C	pršenje: 5 s, interval: 30 s pršenje: 11 s, interval: 1660 s pršenje: 5 s, interval: 30 s
1	55 cm <sup>2</sup>	1,2 cm <sup>2</sup>	EC: 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 21 ur 35 min temperatura: 23 °C	pršenje: 1 s, interval: 86 s pršenje: 1 s, interval: 114 s pršenje: 1 s, interval: 86 s
2	70 cm <sup>2</sup>	1,7 cm <sup>2</sup>	EC: 300 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 21 ur 35 min temperatura: 24 °C	pršenje: 1 s, interval: 86 s pršenje: 1 s, interval: 86 s pršenje: 5 s, interval: 86 s
3	92 cm <sup>2</sup>	2,2 cm <sup>2</sup>	EC: 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 13 ur 51 min temperatura: 25 °C	pršenje: 1 s, interval: 30 s pršenje: 3 s, interval: 30 s pršenje: 3 s, interval: 30 s
4	133 cm <sup>2</sup>	3,2 cm <sup>2</sup>	EC: 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 21 ur 35 min temperatura: 24 °C	pršenje: 1 s, interval: 1800 s pršenje: 1 s, interval: 1800 s pršenje: 1 s, interval: 1800 s
5	130 cm <sup>2</sup>	3,2 cm <sup>2</sup>	EC: 300 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 4 ure 48 min temperatura: 24 °C	pršenje: 14 s, interval: 86 s pršenje: 15 s, interval: 114 s pršenje: 14 s, interval: 86 s
6	146 cm <sup>2</sup>	3,6 cm <sup>2</sup>	EC: 300 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 21 ur 35 min temperatura: 23 °C	pršenje: 15 s, interval: 311 s pršenje: 15 s, interval: 311 s pršenje: 15 s, interval: 311 s
7	182 cm <sup>2</sup>	4,8 cm <sup>2</sup>	EC: 1034 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 13 ur 15 min temperatura: 25 °C	pršenje: 15 s, interval: 564 s pršenje: 15 s, interval: 508 s pršenje: 15 s, interval: 480 s
8	262 cm <sup>2</sup>	6,4 cm <sup>2</sup>	EC: 434 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 21 ur 35 min temperatura: 26 °C	pršenje: 1 s, interval: 1800 s pršenje: 1 s, interval: 1800 s pršenje: 1 s, interval: 1800 s
9	302 cm <sup>2</sup>	7,6 cm <sup>2</sup>	EC: 300 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 21 ur 35 min temperatura: 27 °C	pršenje: 15 s, interval: 255 s pršenje: 15 s, interval: 760 s pršenje: 15 s, interval: 367 s
10	355 cm <sup>2</sup>	8,9 cm <sup>2</sup>	EC: 300 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ , pH: 6,0 vklop luči: 21 ur 35 min temperatura: 26 °C	pršenje: 15 s, interval: 255 s pršenje: 15 s, interval: 760 s pršenje: 15 s, interval: 367 s

## Poglavje 6

### Sklepne ugotovitve

V magistrski nalogi smo uspešno zgradili hidroponični sistem in vanj vgradili zmožnost popolnoma avtonomne zaprtozančne regulacije. Iz tega vidika smo sicer zelo kompleksen sistem naredili preprost za uporabo, saj avtomatizacija sistema in strojno učenje poskrbita za rastline. Upravljalca jih mora le presaditi in registrirati v sistem. Poleg preprostosti uporabe hidroponičnega sistema, smo si zastavili tudi cilj, da bi izdelan hidroponični sistem uspel regulirati parametre vsaj tako dobro kot ekspert. V času, ki smo ga imeli na voljo, smo uspeli opraviti le 5 eksperimentov, kjer smo uporabili in ovrednotili zaprtozančno regulacijo. Zato moramo rezultate v vsakem primeru interpretirati previdno.

V eksperimentih, ki smo jih izvedli z ekspertnimi nastavitvami, so najboljši eksperimenti dosegali končno skupno listno površino  $320 \text{ cm}^2$  in povečanje listne površine v času eksperimenta za 322 %. V najboljših zaprtozančnih eksperimentih smo dosegli zelo primerljive in celo nekoliko boljše rezultate: skupna listna površina  $363 \text{ cm}^2$  in povečanje listne površine v času eksperimenta za 643 %. Na podlagi teh podatkov smo mnenja, da je bil cilj vsaj enakovredne rasti ekspertnim nastavitvam, dosežen. Glede na trend izboljševanja rezultatov skozi iteracije zaprtozančnih eksperimentov pa menimo, da je zelo verjetno, da bomo v prihodnjih iteracijah dosegli še nekoliko boljše rezultate.

Nekoliko pod pričakovanji je bila točnost napovednih modelov, ki jih z nobenim pristopom nismo mogli izboljšati. Šum v podatkih, ki je glavni vzrok slabe točnosti, izhaja večinoma iz načina ocenjevanja rasti rastline, ki smo si ga izbrali. Rast ocenimo z zajemom listne površine rastline s pomočjo fotografiranja iz ptičje perspektive. Tako zajeta listna površina ni nikoli enaka dejanski listni površini rastline. Spoznali smo, da lahko tudi kar močno variira, saj se listi rastlin iz dneva v dan obračajo drugače ali vihajajo. V nadaljevanju bomo eksperimente izvajali tudi dlje kot samo prvih 10 dni, kjer upamo na boljšo točnost napovednih modelov, saj bi dodaten vzrok za šum v zbranih podatkih lahko bil tudi stres ob samem presajanju rastline. Menimo, da smo si v okviru omejitev eksperimentov, posebno za modeliranje, izbrali najtežavnejše in najbolj nepridvidljivo obdobje rasti rastline.

Z raziskovanjem bomo torej nadaljevali, v mislih imamo tudi nekaj možnosti za izboljšave, kot so:

- vpeljava občasne naključnosti v *optimalne* nastavitve hidroponičnega sistema, s čimer bi zaprtozančni sistem adaptivne regulacije prisilili, da občasno razišče nekaj novega prostora nastavitve,
- zamenjava vgrajenega sistema za bolj zmogljivega, ki bo prinesel hitrejši izračun optimalnih nastavitvev in nam odprl tudi možnost da nastavitve preverjamo za več kot en dan v prihodnost,
- dograditev sistema za zajem listne vsebnosti klorofila, ki je pokazatelj zdravja rastline,
- izgradnja novega sistema z drugačnim načinom dovajanja hranil.

## Dodatek A

### Težave pri pri zaznavanju rasti

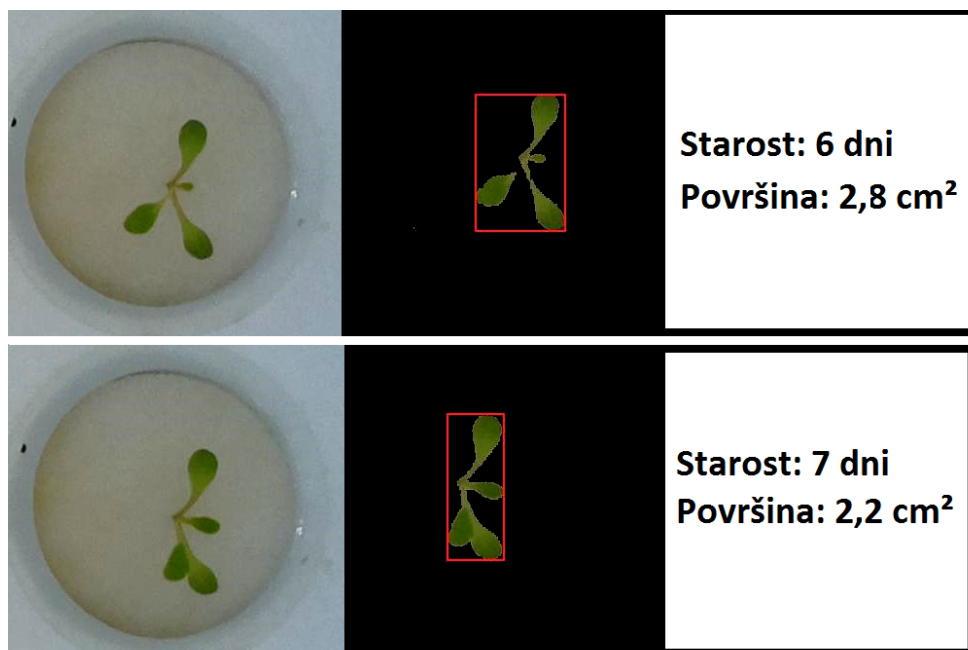
V tem dodatnem poglavju bomo skušali pojasniti slabo točnost napovednih modelov rasti rastlin, ki smo jo predstavili v poglavju 4 in razpršenost oziroma zašumljenost podatkov, ki smo jo predstavili na grafikonih v poglavju 5.

V splošnem lahko nekaj napake pri gradnji modela in razpršenosti podatkov pripišemo genetski raznolikosti rastlin. Identificirali pa smo še 3 dodatne dejavnike:

- vihanje in obračanje listov,
- razrast podlage z algami,
- različni pogoji glede na mesto v pladnju za vzgojo rastlin.

#### A.1 Vihanje in obračanje listov

Z vihanjem in obračanjem listov imamo v mislih spremembe kotov, pod katerimi listi izraščajo iz glavnega rastlinskega stebela in njihovo vzdolžno in prečno vihanje. Rezultat teh premikov je lahko tudi prekrivanje listov. Metoda, ki smo si jo izbrali za merjenje rasti, ni zmožna zaznati tovrstnega pojava. Pri zajemu fotografij rastlin sicer lahko opazimo, da se je listna površina rastline zmanjšala (ali pa prekomerno povečala, v kolikor se listi



**Slika A.1:** Prikaz problematike premikanja, prekrivanja in vihanja listov rastline. Rastlini, ki jo vidimo na slikah, se je glede na uporabljen način merjenja zmanjšala listna površina, čeprav se je njena prava listna površina povečala.

postavimo v bolj ugodno pozicijo), ne moremo pa vedeti, ali je tako opazanje posledica vihanja ali pa mogoče rastlina propada. Ker nujno potrebujemo podatek o propadanju rastline, takih meritev ne moremo izločiti. Primer rastline, kjer se je listna površina v dveh zaporednih merjenjih, glede na izbrano metodo merjenja, zmanjšala je viden na sliki A.1.

## A.2 Razrast podlage z algami

Razraščanje rastlinske podlage z algami je težava, s katero smo se nekajkrat soočili v primeru zelo intenzivnega dovajanja hranil (dolgi interval razprševanja, kratki presledki). Rastline v hidroponični sistem namestimo tako, da jih najprej namestimo v penast obroček. V kolikor je volumen dovajanja hranil





**Slika A.2:** Prikaz problematike razraščanja rastlinske podlage z algami. Na levi strani je prikazan surov posnetek, na desni pa avtomatsko obdelan posnetek. Na obdelanem posnetku so vse slikovne točke, ki niso črne barve, smatrane kot listna površina.

prevelik, se obroček navlaži, kar ustvari ugodno okolje za razvoj alg. Alge sicer ne vplivajo na rast rastline, vendar nam povzročajo težave pri zaznavanju listne površine, saj je njihova barva zelo podobna barvi listov solate. Primer posnetka rastline s prisotnimi algami je viden na sliki A.2. Posnetek rastline, kjer so prisotne alge, nam pri zaznavanju listne površine prinese napako, ki je bila običajno od 10 % do 40 %, v ekstremnih primerih pa tudi 80 %. Z napako smo se soočili tako, da smo prizadet penasti obroček zamenjali s čistim, listno površino v preteklih posnetkih pa odčitali ročno.

### A.3 Različni pogoji glede na mesto v pladju za vzgojo rastlin

Opazili smo, da imajo rastline, glede na mesto v pladju za vzgojo rastlin, nekoliko drugačne pogoje. Hipotezo smo potrdili z izračunom povprečne dosežene listne površine glede na posamezna mesta za rastline. Ugotovili smo, da rastline ob robu dosegaajo manjšo listno površino. Rezultate smo

LEVI PLADENJ			SREDNJI PLADENJ			DESNI PLADENJ		
4,0	2,6	1,7	1,8	3,0	1,9	3,4	3,0	3,0
4,1	4,2	2,3	2,8	3,7	2,6	3,9	2,8	1,7
5,5	4,7	4,5	2,6	3,3	3,3	4,8	3,6	2,6
4,6	5,1	4,5	3,5	3,2	3,4	4,0	4,1	3,7
2,5	2,6	3,7	2,9	4,2	3,7	3,1	3,1	3,0

**Slika A.3:** Prikaz povprečnih doseženih listnih površin na posameznih mestih na vseh treh pladnjih za vzgojo rastlin. Vsaka celica predstavlja eno mesto za vzgojo rastlin, številka v celici pa predstavlja povprečno doseženo listno površino v  $\text{cm}^2$  vseh rastlin, ki so uspevale na tem mestu.

predstavili na sliki A.3. Da bi preizkusili vpliv različnih pogojev na različnih mestih v pladju smo izvedli nekaj preizkusov napovedne točnosti s pomočjo navzkrižne validacije. Napovedno točnost smo izračunali na načine, kjer smo iz učnih in testnih množic odstranili:

- vse rastline, ki so bile posajene na mestih, kjer so dosegale zelo slabo povprečno listno površino (manj kot  $2 \text{ cm}^2$ ),
- vse rastline, ki so bile posajene na mestih, kjer so dosegale slabo povprečno listno površino (manj kot  $2,5 \text{ cm}^2$ ),
- vse rastline ki so bile posajene na mestih, kjer so dosegale nadpovprečno rast (več kot  $4,6 \text{ cm}^2$ ).

Ker v nobenem od teh primerov napake pri napovedih listne površine nismo mogli zmanjšati za več kot 3 %, smo se odločili da izločevanja ne bomo izvajali. Raziskavo smo tako zaključili z domnevo, da podatek o predhodni listni površini modelu v večji meri že zagotovi dovolj informacij za pravilni izračun, ne glede na mesto rastline.

# Literatura

- [1] licence-cc.pdf.  
URL <https://ucilnica.fri.uni-lj.si/course/view.php?id=274>
- [2] G. L. Barbosa, F. D. Gadelha, N. Kublik, A. Proctor, L. Reichelm, E. Weissinger, G. M. Wohlleb, R. U. Halden, Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods, International Journal Of Environmental Research And Public Health št. 12, zv. 6, str. 6879–6891, 2015.
- [3] Resh, Howard M, Hydroponics for the home grower, CRC Press, 2015, pogl. 2–4.
- [4] (2016) Wikipedia - Aeroponics, dostopno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aeroponics>, (pridobljeno: 25. 12. 2016).
- [5] (2016) Wikipedia - Nutrient film technique, dostopno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Nutrient\\_film\\_technique](https://en.wikipedia.org/wiki/Nutrient_film_technique), (pridobljeno: 25. 12. 2016).
- [6] (2016) Wikipedia - Ebb and flow, dostopno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ebb\\_and\\_flow](https://en.wikipedia.org/wiki/Ebb_and_flow), (pridobljeno: 25. 12. 2016).
- [7] H. Nishina, Development of speaking plant approach technique for intelligent greenhouse, Agriculture and Agricultural Science Procedia št. 3 (2015) str. 9–13.

- 
- [8] U. Ahmad, D. M. Subrata, C. Arif, Speaking plant approach for automatic fertigation system in greenhouse, *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition* št. 4, zv. 3 (2011) str. 95–106.
- [9] Yeh Yu-Hui Flora, Lai Tsung-Cheng, Liu Ting-Yu, Liu Chang-Chih, Chung Wei-Chang, Lin Ta-Te, Special issue: Image analysis in agriculture: An automated growth measurement system for leafy vegetables, *Image Analysis in Agriculture* št. 117 (2014) str. 34–50.
- [10] Sam E. Wortman, Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and ph in an ebb-and-flow hydroponic system, *IScientia Horticulturae* št. 194, zv. 11, str. 34–42, 2015.
- [11] D. Savvasa, E. Stamatib, I.L. Tsirogiannisb, N. Mantzosb, P.E. Barouchasb, N. Katsoulasc, C. Kittasc, Interactions between salinity and irrigation frequency in greenhouse pepper grown in closed-cycle hydroponic systems, *Agricultural Water Management* št. 91, zv. 1–3 (2007) str. 102–111.
- [12] Paul R. Kemp, Gary L. Cunningham, Light, temperature and salinity effects on growth, leaf anatomy and photosynthesis of *distichlis spicata* (L.) greene, *American Journal of Botany* št. 68, zv. 4 (1981) str. 507–516.
- [13] Chiloane Thikanang Silence, Effect of nutrient concentration and growing seasons on growth, yield and quality of leafy lettuce (*lactuca sativa* L.) in a hydroponic system.
- [14] D. S. Domingues, H. W. Takahashi, C. A. Camara, S. L. Nixdorf, Automated system developed to control ph and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production, *Computers and electronics in agriculture* št. 84 (2012) str. 53–61.
- [15] Rius-Ruiz F. Xavier, Andrade Francisco J., Riu, Jordi, Rius F. Xavier, Analytical methods: Computer-operated analytical platform for the de-

- termination of nutrients in hydroponic systems, Food Chemistry št. 147 (2014) str. 92–97.
- [16] Kaneda, Yukimasaa, Ibayashi Hirofumib, Oishi Naokic, Mineno Hiroshia, Greenhouse Environmental Control System Based on SW-SVR, Procedia Computer Science št. 60 (2015) str. 860–869.
- [17] M. Zaidi, H. Murase, N. Honami, Neural network model for the evaluation of lettuce plant growth, Journal of agricultural engineering research št. 74, zv. 3 (1999) str. 237–242.
- [18] C. Paine, T. R. Marthews, D. R. Vogt, D. Purves, M. Rees, A. Hector, L. A. Turnbull, How to fit nonlinear plant growth models and calculate growth rates: an update for ecologists, Methods in Ecology and Evolution št. 3, zv. 2 (2012) str. 245–256.
- [19] N. Bessonov, V. Volpert, Dynamical models of plant growth, Mathematics Subject Classification.
- [20] T. Fourcaud, X. Zhang, A. Stokes, H. Lambers, C. Körner, Plant growth modelling and applications: the increasing importance of plant architecture in growth models, Annals of Botany št. 101, zv. 8 (2008) str. 1053–1063.
- [21] (2016) ResponzIO, dostopno na: <http://www.croptech.com/en/eshop/>, (pridobljeno: 28. 11. 2015).
- [22] (2016) Plantui 6, dostopno na: <http://plantui.com/smart-gardens/plantui-6/>, (pridobljeno: 28. 11. 2015).
- [23] (2016) Root, dostopno na: <http://growwithroot.com>, (pridobljeno: 28. 11. 2015).
- [24] (2016) Niwa, dostopno na: <http://getniwa.com/about.html>, (pridobljeno: 28. 11. 2015).

- 
- [25] (2016) MIT Open Agriculture, dostopno na: <http://openag.media.mit.edu/about/>, (pridobljeno: 8. 1. 2017).
- [26] (2016) RaspberryPi, dostopno na: <https://www.raspberrypi.org>, (pridobljeno: 2015. 11. 28).
- [27] (2016) Arduino Mega 2560, dostopno na: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>, (pridobljeno: 2015. 11. 28).
- [28] (2016) Raspbian, dostopno na: <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>, (pridobljeno: 2015. 11. 28).
- [29] (2016) Mono, dostopno na: <http://www.mono-project.com/>, (pridobljeno: 2015. 11. 28).
- [30] (2016) Accord .NET, dostopno na: <http://accord-framework.net/>, (pridobljeno: 2015. 11. 28).
- [31] J. Rawlings, D. Mayne, Model Predictive Control: Theory and Design, Nob Hill Pub, 2009, pogl. 1–2.
- [32] T. Morimoto, Y. Hashimoto, AI approaches to identification and control of total plant production systems, Control Engineering Practice št. 8, zv. 5 (2000) str. 555–567.
- [33] Haykin, Simon S, Neural networks, 2. izdaja, Pearson Upper Saddle River, NJ, ZDA:, 1999, pogl. 1, 2 in 4.
- [34] D. Peckenpaugh, Hydroponic Solutions: Volume 1: Hydroponic Growing Tips, New Moon Publishing, Inc., 2004.
- [35] (2016) Wikipedia - Backpropagation, dostopno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Backpropagation>, (pridobljeno: 4. 1. 2017).
- [36] S. Wright, J. Nocedal, Numerical optimization, Springer Science, št. 35, 1990, str. 67–68.

- 
- [37] J. Friedman, T. Hastie, R. Tibshirani, The elements of statistical learning, 2. izdaja, Springer series in statistics Springer, Berlin, 2009, pogl. 7.
- [38] (2016) Wikipedia - Root mean square deviation, dostopno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Root-mean-square\\_deviation](https://en.wikipedia.org/wiki/Root-mean-square_deviation), (pridobljeno: 4. 1. 2017).
- [39] (2016) Relative absolute error, dostopno na: <http://www.gepsoft.com/gxpt4kb/Chapter10/Section2/SS15.htm>, (pridobljeno: 4. 1. 2017).
- [40] M. Mitchell, An introduction to genetic algorithms, MIT press, 1998, pogl. 1.
- [41] T. Back, Evolutionary algorithms in theory and practice: evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms, Oxford university press, 1996, str. 117–120.